

# **Modelação numérica do controlo e posicionamento de AUV's em estações de docagem subaquática**

*Ricardo João Duarte Roda*

## **Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. Francisco Jorge Teixeira de Freitas

Orientador no INEGI: Eng. Tiago António Nunes da Silva Morais



**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**  
**Especialização em Automação**

17 de Dezembro de 2018

*A ambas as minhas avós pelo carinho e apoio que sempre me deram.*

## Resumo

A motivação central deste trabalho foi o desenvolvimento de soluções para veículos submarinos autónomos AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), nomeadamente as metodologias e os sistemas envolvidos na docagem.

Para este fim, focou-se no estudo do controlo do posicionamento vertical de um AUV durante a aproximação a uma estação de docagem. Este controlo é de extrema importância durante o processo de docagem, mas estando atualmente pouco explorado. No âmbito desta dissertação pretendeu-se ajustar o processo de docagem de modo a evitar situações problemáticas de colisão e consequente dano das estações e dos veículos.

Para enfrentar este problema optou-se por desenvolver um modelo numérico, segundo as características mais comuns dos modelos de AUVs existentes na indústria, e simulá-lo em *MatLab Simulink* de modo a analisar as trajetórias dinâmicas de aproximação às estações de docagem. O modelo desenvolvido, para além das características dinâmicas do corpo do veículo, tem em conta os sistemas de controlo e sistemas de movimentação de modo a simular os diferentes componentes que interferem no desenvolvimento das trajetórias.

Inicialmente realizou-se o “Enquadramento do estado de desenvolvimento dos AUVs”, de modo a analisar os AUVs já existentes na indústria – com principal foco nas metodologias de posicionamento e de controlo, sistemas de movimentação dinâmicos e estáticos e estruturas e materiais aplicados nestes veículos. Examinou-se também brevemente os sistemas de docagem atuais para compreender estas estruturas e as condições a que as trajetórias estarão sujeitas.

Em seguida e tendo em conta o objetivo final, foi desenvolvido um modelo numérico a partir da informação encontrada no passo anterior. Começou-se por definir as condições e características do modelo, nomeadamente as equações de movimento e metodologias de controlo, tendo-se optado por desenvolver um AUV sem nenhuma geometria particular, com Hélices (como sistema dinâmico) e um sistema de reservatórios de lastro de água (como sistema estático), controlados por um controlador PD com feedback de aceleração (Km). Após a construção do modelo realizou-se a sua simulação aplicando diversas gamas de valores de entrada testando assim as diferentes respostas apresentadas pelo modelo.

Numa fase final foram analisadas as respostas obtidas tirando as conclusões necessárias para avaliação do modelo segundo: sobrelongação, tempo de acomodação, eficiência energética e custo. De acordo com as respostas, foi concluído que é possível realizar trajetórias de docagens amortecidas (sem sobrelongação) a tempos de acomodação reduzidos, sendo isto possível controlando os seguintes fatores do modelo:

- as capacidades e limitações dos sistemas de movimentação que controlam a velocidade de aproximação, permitindo reduzir os tempos de acomodação com o risco do aumento da sobrelongação e instabilidade do sistema,
- as variáveis de controlo da alimentação dos sistemas de movimentação, permitindo a diminuição da sobrelongação e instabilidade do sistema em troca do aumento do tempo de acomodação;
- as variáveis que controlam o início de atuação de cada um dos sistemas de movimentação, permitindo conservar energia a custo de possíveis problemas em termos de sobrelongação e tempos de acomodação;

Ajustando cada uma das variáveis é possível o controlo da forma da trajetória de docagem de modo a obter um tipo de trajetória desejado.

## Elaboration of numerical models for control and positioning of autonomous vehicles in underwater docking stations

### *Abstract*

The thesis' main motivation was the development of AUV (Autonomous Underwater Vehicles) systems, namely the methodologies and processes involved in the docking of such vehicles in proper stations.

To this end, it focused on the study of the position control of an AUV during the approximation to a docking station. This because it is a little explored matter, which leads to problematic situations of collision and damaging of stations and vehicles.

In order to face this issue, a numeric model was developed, according to the most common characteristics of the AUV models existent in the industry, and simulating it in *MatLab Simulink* as to analyze dynamic trajectories of approximation to the docking station. The developed model considers not only the dynamic characteristics of the bodies, but also the control and movement systems associated to these vehicles. This allowed to simulate the different components that interfere in the development of the trajectories.

Initially, the industry's state of development of AUVs was studied to analyze the already-existent AUVs in the industry – focusing mainly in the methodologies of positioning and control, dynamic and static movement systems and the structures and materials applied to these vehicles. It was also examined briefly the current docking systems to understand these structures and the conditions to which the trajectories will be subjected to.

Following this and considering the final objective, the numeric model was constructed from the data gathered during the previous step. First the conditions and characteristics of the model were defined, namely the movement equations and the methodologies of control. It was chosen to develop an AUV without a specific geometry, but with propellers (as dynamic systems) and a ballast system (as a static system), regulated by a PD controller with an acceleration feedback (Km). After the construction of the model, it was simulated applying several ranges of entry values, which allowed to test for different responses presented by the model.

In a final stage, the obtained responses were analyzed, which lead to necessary conclusions to evaluate the model according the following aspects: overshoot, accommodation time, energetic efficiency and cost. Having these in account, it was possible to conclude that it is possible to achieve damped docking trajectories (i.e. without overshoot) in reduced accommodation times. This is attainable by controlling these aspects of the model:

- The capacities and limitations of the movement systems that control the approximation velocity, allowing to reduce the accommodation times with the risk of increasing the overshoot and the system's instability;
- The control variables for the movement systems' energy supply, allowing a reduction of the overshoot and the system's instability in exchange for the increase of the settling time;
- The variables which control when each of the movement systems needs be powered, allowing to preserve energy at the risk of possible problems relating to overshoot and settling times.

Adjusting each of these variables, it is possible to control the docking trajectory shape, in order to obtain a certain desired trajectory type.

## Índice de conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Breve contextualização da evolução dos veículos subaquáticos .....	1
1.2	Enquadramento e importância da docagem .....	4
1.3	Objetivos e Requisitos .....	5
1.4	Metodologias utilizadas e Estrutura da dissertação .....	6
2	Enquadramento do estado de desenvolvimento dos AUVs .....	7
2.1	Veículos Submarinos autónomos .....	7
2.1.1	Metodologias de Posicionamento e Controlo .....	8
2.1.2	Sistemas de Movimentação vertical .....	10
2.1.3	Estrutura e Materiais .....	23
2.2	Estações de docagem .....	25
2.2.1	Estruturas e Sistemas de acoplamento .....	25
2.2.2	Métodos de comunicação e georreferenciação .....	26
3	Modelos numéricos .....	27
3.1	Modelo definido .....	28
3.2	Equações de movimento .....	29
3.3	Metodologia de controlo .....	38
3.4	Modelo de simulação em Matlab Simulink .....	49
4	Análise dos resultados .....	66
5	Conclusões .....	70
	Referências .....	71

## Índice de figuras

Figura 1.1 - Exploração dos recursos das massas de água [1] .....	1
Figura 1.2 - Réplica do “Turtle” de David Bushnell de 1775 .....	2
Figura 1.3 - Submarino tripulado: LULA 1000.....	2
Figura 1.4 - Whitehead Automobile “fish” Torpedo .....	2
Figura 1.5 - ROVs (Veículo Operado Remotamente).....	2
Figura 1.6 - Self Propelled Underwater Research Vehicle ou SPURV .....	3
Figura 1.7 - Advanced Unmanned Search System” (AUSS) .....	3
Figura 1.8 - Odyssey do MIT .....	3
Figura 1.9 - Autonomous Benthic Explorer (ABE) da WHOI .....	3
Figura 2.1 - AUV e os seus diversos possíveis componentes.....	7
Figura 2.2 - Hélices de um AUV. ....	11
Figura 2.3 - Jato de água.....	12
Figura 2.4 - Glider (SLOCUM) [20]. ....	13
Figura 2.5 - Esquema do posicionamento de Reservatórios de lastro (Ballast tanks – a azul) num AUV [13]. ....	14
Figura 2.6 - Sistema de válvulas de controlo associadas a um sistema de variação de lastro. [13] .....	15
Figura 2.7 - Reservatório de lastro de volume variável. [17] .....	15
Figura 2.8 - Esquema de um sistema de bexiga de óleo (oil bladder).[10] .....	16
Figura 2.9 - Esquema de um sistema hidráulico termicamente acionado. ....	18
Figura 2.10 - Esquema da trajetória realizada por um <i>Glider</i> . ....	19
Figura 2.11 - Módulo de um gerador termoelétrico.....	20
Figura 2.12 - Leme e Asas de um AUV. ....	22
Figura 2.13 - Diagrama de um AUV com um sistema de massas internas móveis. ....	23
Figura 2.14 - AUV em forma de torpedo (REMUS). ....	23
Figura 2.15 - Plataforma de docagem de jaula em forma de cone. ....	25
Figura 2.16 - Plataforma de docagem de barra.....	25
Figura 2.17 - Plataforma de docagem de cabo de amarração.....	25
Figura 2.18 - Plataforma de docagem de jaula em forma retangular.....	25
Figura 2.19 - Plataforma de docagem horizontal.....	25
Figura 3.1 - Referenciais definidos: BODY (esquerda); NED (direita).....	30
Figura 3.2 - Diagrama em Matlab Simulink do SWITCH. ....	41
Figura 3.3 - Diagrama em Matlab Simulink do modelo das Hélices. ....	42
Figura 3.4 - Diagrama em Matlab Simulink do modelo dos Reservatórios de água. ....	44
Figura 3.5 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Malha fechada simples. ....	45
Figura 3.6 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de controlador PD com <i>feedback</i> de aceleração (Km).....	48
Figura 3.7 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Malha fechada simples – atuação ideal. ....	49
Figura 3.8 - Respostas do sistema de Malha fechada simples– atuação ideal.....	50

Figura 3.9 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – atuação ideal.....	51
Figura 3.10 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – atuação ideal, para diferentes características dinâmicas.....	52
Figura 3.11 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – atuação ideal, para diferentes constantes de controlo.....	53
Figura 3.12 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices.....	54
Figura 3.13 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes características dinâmicas.....	55
Figura 3.14 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes constantes de controlo.....	56
Figura 3.15 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes sistemas de atuação.....	57
Figura 3.16 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) - Reservatórios de água.....	58
Figura 3.17 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes características dinâmicas.....	59
Figura 3.18 - - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes constantes de controlo.....	60
Figura 3.19 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes sistemas de atuação.....	61
Figura 3.20 - - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água.....	62
Figura 3.21 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes características dinâmicas.....	63
Figura 3.22 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes sistemas de atuação.....	64
Figura 3.23 - Respostas do sistema de Controlador PD com <i>feedback</i> da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes constantes de controlo.....	65

## Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens do uso das hélices em AUVs.....	11
Tabela 2.2 -Vantagens e Desvantagens do uso dos jatos de água em AUVs.[16].....	12
Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens do uso de reservatórios de lastro (água) em AUVs.....	15
Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens do uso de bexigas de óleo em AUVs.....	16
Tabela 2.5 - Vantagens e Desvantagens do uso de Geradores hidráulicos acionados termicamente em AUVs.....	21

# 1 Introdução

## 1.1 Breve contextualização da evolução dos veículos subaquáticos

A água desempenhou um papel fulcral na origem da vida, da evolução da Humanidade e das suas civilizações. Desde a Antiguidade que o Homem tem optado por instalar-se na proximidade de rios e mares devido aos climas mais amenos, abundância de alimento e outros recursos. A interação com os meios aquáticos, para além das vantagens referidas, conduziu ao desenvolvimento de vários aspetos culturais, científicos e tecnológicos.

Infelizmente grande parte das massas de água do planeta permanecem ainda hoje inexploradas, mantendo-se inaproveitado grande parte do seu potencial. Poços de petróleo, fontes de energia renováveis (ondas do mar, correntes marinhas, marés, fontes hidrotermais), fauna, flora e geografia do fundo oceânico são alguns dos interesses científicos e comerciais que levam diversas indústrias (indústria das energias; e da exploração marítima, Geólogos, Biólogos, etc.) a apostar nas tecnologias de exploração oceânica [Fig.1.1] [1].



Figura 1.1 - Exploração dos recursos das massas de água [1]

A exploração subaquática remonta à origem dos mergulhadores da antiguidade. No entanto, este método expedito sempre se revelou pouco eficaz e de alto risco. Nos últimos séculos têm sido desenvolvidos outros métodos mais eficientes, tais como sondas marítimas, sistemas de sonares e veículos submarinos, sendo estes últimos objeto desta dissertação.

O primeiro veículo submarino pode ser considerado o “Turtle” [Fig.1.2], um pequeno submarino de madeira, de forma oval, desenvolvido pelo norte-americano David Bushnell em 1775 [2]. O “Turtle” foi o pioneiro dos veículos submarinos tripulados, abrindo o caminho aos submarinos militares e de exploração que conhecemos nos dias de hoje. Os submarinos de exploração tripulados [Fig.1.3] são controlados internamente por uma ou duas pessoas, levando os tripulantes até aos locais de interesse e possibilitando um estudo direto. No entanto estes veículos estão limitados a um número restrito de missões, uma vez que necessitam de cumprir vários requisitos de segurança inerentes ao facto de transportarem tripulantes humanos.





Figura 1.2 - Réplica do “Turtle” de David Bushnell de 1775

Os veículos submarinos não tripulados só começaram a ser desenvolvidos no final do século XIX, podendo ser designado o torpedo guiado “Whitehead Automobile “fish” Torpedo” [Fig.1.4] como o primeiro exemplo deste tipo [3]. O “Whitehead” era um torpedo explosivo norte-americano desenvolvido em 1866 que possuía o seu próprio sistema de propulsão pneumático.



Figura 1.3 - Submarino tripulado: LULA 1000.

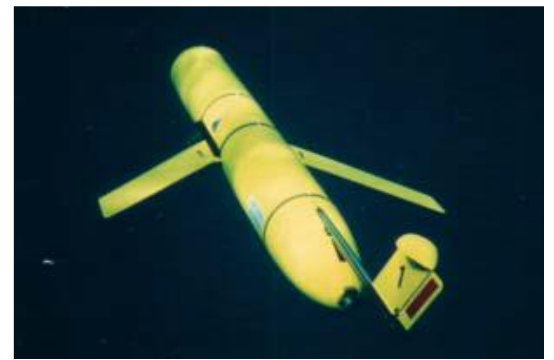


Figura 1.4 - Whitehead Automobile “fish” Torpedo

O primeiro tipo de veículos não tripulados foi designado como ROVs (Veículo Operado Remotamente) [Fig.1.5]. Estes veículos são controlados remotamente, dispensando a necessidade de tripulantes, permitindo executar missões mais ousadas e perigosas sem risco de vidas humanas.

O segundo tipo de veículos não tripulados engloba os veículos autónomos submarinos ou AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) [Fig.1.6,1.7,1.8 e 1.9]. Estes veículos de exploração/investigação marítima são impulsionados por sistemas de propulsão e controlados por computador de bordo, sendo capazes de realizar trajetórias tridimensionais [4]. Estes veículos são capazes de explorar grandes extensões subaquáticas sem qualquer apoio externo, possibilitando o estudo de vastas secções oceânicas a baixo custo. Equipados com diversos sistemas sensoriais, câmaras e sistemas de georreferenciação, os AUVs são capazes de recolher amostras e mapear o fundo oceânico, entre outras tarefas.

Figura 1.5 - ROVs (Veículo Operado Remotamente).



O primeiro AUVs foi desenvolvido em 1957 por Stan Murphy, Bob François e, mais tarde, Terry Ewart tendo o nome de " Self Propelled Underwater Research Vehicle ", ou SPURV [Fig.1.6] [5]. O SPURV era capaz de navegar autonomamente a pressão constante movimentando-se em dente de serra na coluna de água, comunicando com a superfície através de sinais acústicos. Este AUV foi o ponto de partida para o desenvolvimento de muitos outros modelos como o “Advanced Unmanned Search System” (AUSS) [Fig.1.7] da SPAWAR (American Space and Naval Warfare Systems Command) [6]; o Odyssey [Fig.1.8] do MIT (Massachusetts Institute of Technology) [7]; o Autonomous Benthic Explorer (ABE) [Fig.1.9] da WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) [8][9]; entre outros, levando ao desenvolvimento dos sistemas de propulsão, georreferenciação, comunicação e de controlo dos AUVs.

Estes veículos, como se irá observar nos capítulos que se seguem, possuem diversas configurações de estruturas, sistemas de propulsão, comunicação, georreferenciação e controlo.

Esta dissertação foca-se na análise das soluções de controlo da posição em profundidade durante a tentativa de acoplamento a uma estação de docagem própria para AUVs. Este estudo é realizado através de modelos numéricos com diferentes configurações de sistemas de propulsão e controlo. É feito neste estudo o foco no controlo de posição vertical, desprezando movimentos de rotação e translação horizontal de forma a obter paragens amortecidas e precisas, que são necessárias durante o acoplamento com as estações de docagem.



Figura 1.6 - Self Propelled Underwater Research Vehicle ou SPURV



Figura 1.7 - Advanced Unmanned Search System” (AUSS)



Figura 1.8 - Odyssey do MIT



Figura 1.9 - Autonomous Benthic Explorer (ABE) da WHOI

## 1.2 Enquadramento e importância da docagem

Os veículos submarinos autónomos (Autonomous Underwater Vehicles – AUV) são uma das principais ferramentas utilizadas na exploração marítima, sendo capazes de realizar o mapeamento e recolha de amostras do fundo do mar sem qualquer apoio externo humano. O maior obstáculo na utilização destes equipamentos é o ambiente de aplicação. O fundo do mar, para além de ser hostil ao Homem, devido às baixas temperaturas e às elevadas pressões, é caracterizado por uma vasta imensidão de difícil acesso, dificultando o controlo, a comunicação e a manutenção dos AUVs. As características do meio marinho e as dificuldades de lançamento e recolha dos veículos fazem com que a autonomia seja um ponto fulcral no seu desenvolvimento e otimização.

A otimização da autonomia dos AUV, na prática tem 3 ângulos de abordagem:

- diminuição dos gastos energéticos do AUV (associados com o dimensionamento dos seus componentes),
- aumento da capacidade da fonte de energia, e
- acesso a uma estação de recarregamento (estação de docagem).

As duas primeiras soluções estão associadas à conceção e dimensionamento do veículo e dependentes da evolução tecnológica dos atuadores, sistemas de controlo, fontes de energia e outros equipamentos aplicados aos AUVs. Consequentemente a otimização da autonomia permitida por estas soluções é limitada pelo rendimento coletivo de cada equipamento.

No caso da terceira solução o uso de estações de docagem permite um aumento exponencial da autonomia através do recarregamento da fonte de energia do veículo, sendo este processo limitado unicamente pela autonomia energética do AUV em relação à estação.

As estações de docagem são estruturas que disponibilizam a acoplagem dos AUVs permitindo-os recarregar e ainda transferir e armazenar dados de missões. As estruturas existentes na indústria variam de solução para solução, mas um problema comum é a dificuldade da realização de acoplamento adequado entre o AUV e a estação de docagem. Esta dificuldade surge tipicamente devido ao baixo controlo da posição do veículo no espaço tridimensional que dificulta a aproximação suave, levando a impactos que podem danificar o equipamento.

A presente dissertação aborda o uso destas estações de docagem e incide no estudo dos problemas intrínsecos na sua utilização nomeadamente a análise dos sistemas de propulsão e o controlo do posicionamento em profundidade.

### 1.3 Objetivos e Requisitos

Ao longo desta dissertação será abordado o processo de docagem de AUVs em estações próprias para estes veículos. O estudo aborda os equipamentos e as soluções mais utilizadas na indústria identificando os problemas mais comuns no processo de docagem. A caracterização das dificuldades no acoplamento permitirá a sua correção mediante desenvolvimento de soluções de atuação e controlo.

Nesta dissertação são desenvolvidos modelos numéricos com determinadas soluções de atuação e controlo na tentativa de eliminar ou pelo menos reduzir estes problemas.

São estes modelos numéricos os principais objetos de estudo e objetivo essencial desta dissertação:

Primeira fase: Identificação e caracterização dos sistemas de movimentação e controlo de trajetória dos veículos autónomos, indicando as vantagens e desvantagens na sua aplicação. Paralelamente fazer a análise das soluções existentes de estações de docagem, definindo as diferentes estruturas e métodos de acoplagem mais comuns.

Nestes estudos são apresentados também os diferentes materiais e sistemas de comunicação e georreferenciação utilizados.

Segunda fase: Modelação numérica do comportamento dinâmico de um AUV. Utilizando o modelo numérico obtido são aplicados os diferentes sistemas de movimentação e controlo selecionados na primeira fase. São simulados estes modelos em *Matlab Simulink* testando as suas respostas no controlo de posição ao longo da coluna de água.

As respostas obtidas devem testar diferentes valores de entrada para os modelos: massa, volume e coeficientes de arrasto do AUV; capacidades e limites dos sistemas de movimentação. Para além destes fatores deve ser possível ajustar o controlo da aproximação de modo a obter aproximações suaves.

Os modelos desenvolvidos apresentarão diferentes níveis de complexidade de controlo e atuação de modo a facilitar a análise dos sistemas aplicados. Os sistemas de atuação e controlo serão escolhidos segundo a frequência de utilização na indústria e capacidades apresentadas na primeira fase.

Terceira fase: Analisar os resultados numéricos obtidos na fase anterior de forma a avaliar os aspetos seguintes:

- Capacidade de cada solução realizar aproximações suaves a estações de docagem. Avaliar esta capacidade segundo a existência ou não de overshoot, manobrabilidade, curva de aproximação, etc.;
- Velocidades de aproximação e tempo de resposta de cada solução segundo a variação das variáveis de entrada;
- Capacidade de dimensionamento dos sistemas de movimentação segundo condições propostas (através do modelo adequado).

Após estas três fases serão retiradas conclusões sobre o trabalho, nomeadamente a viabilidade e acessibilidade de implementação, falhas e problemas das soluções desenvolvidas; o futuro do modelo e mudanças necessárias, tal como outras observações pertinentes.

#### 1.4 Metodologias utilizadas e Estrutura da dissertação

O trabalho descrito nesta dissertação foi desenvolvido utilizando metodologias de análise e conhecimentos lecionados no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP. Segundo estes conhecimentos e os objetivos estabelecidos desenvolveu-se esta dissertação de acordo com a seguinte estrutura.

No Capítulo 1, intitulado "Introdução", é feita uma contextualização da evolução dos veículos autónomos subaquáticos e evidenciada a importância dos sistemas de docagem.

No Capítulo 2 é apresentado o "Enquadramento do estado de desenvolvimento dos AUVs", sendo realizado um estudo dos diversos equipamentos e sistemas de controlo associados à indústria dos AUVs. Primeiro são estudados os Veículos submarinos autónomos segundo as suas Metodologias de controlo e posicionamento; Sistemas de Movimentação; Estrutura e Materiais de forma ser possível no capítulo seguinte construir modelos dinâmicos adequados. Em segundo lugar são estudadas as Estações de Docagem segundo as suas Estruturas e Sistemas de acoplamento; Métodos de comunicação e georreferenciação de forma a identificar as necessidades que os modelos numéricos devem satisfazer e dar contexto aos resultados posteriormente obtidos.

No Capítulo 3 são desenvolvidos "Modelos Numéricos", utilizando a informação recolhida sobre AUVs, com diferentes características (metodologias de controlo; sistemas de movimentação; características dinâmicas), segundo o objetivo de obter docagens suaves dos AUVs. Com os modelos construídos são aplicados diferentes valores de entrada de modo a definir as suas curvas de funcionamento.

No Capítulo 4 é realizada a "Análise dos Resultados" obtidos no capítulo anterior, avaliando a sobrelongação e os tempos de acomodação observados nas respostas dos modelos.

No Capítulo 5 são retiradas as "Conclusões" sobre o trabalho, nomeadamente a viabilidade e acessibilidade de implementação, falhas e problemas das soluções desenvolvidas; o futuro do modelo e mudanças necessárias, tal como outras observações pertinentes.



## 2 Enquadramento do estado de desenvolvimento dos AUVs

Neste capítulo é apresentado o Enquadramento do estado de desenvolvimento dos AUVs e estações de docagem. O enquadramento teve como particular foco os mecanismos de movimentação e controlo dos AUVs e sistemas associados à identificação da posição e orientação bem como à comunicação destes veículos com as suas estações de docagem.

Na secção “**Veículos autónomos**” são apresentadas:

- as Metodologias de controlo e posicionamento;
- os Sistemas de movimentação vertical;
- as Estruturas e materiais.

Para cada um destes tópicos indicamos a sua importância e impacto no projeto de AUVs, apresentando as soluções mais comuns na indústria, bem como destacando soluções de interesse para o controlo amortecido e preciso da posição ao longo da coluna de água. Nesta secção são apresentadas as características e desempenhos de cada solução, de forma a ser possível aplicar a informação recolhida no desenvolvimento de modelos numéricos no Capítulo 3 – **Modelos Numéricos**.

Na secção das “**Estações de docagem**” são apresentadas:

- a Estrutura e os Sistemas de docagem;
- os Métodos de comunicação e georreferenciação.

Tal como na secção dos AUVs, para cada um destes tópicos é indentificada a sua importância e o impacto no projeto das estações e AUVs, tentando focar num aspeto mais instrutivo de modo a criar um ponto de referência para a análise dos resultados.

### 2.1 Veículos Submarinos autónomos

Os veículos submarinos autónomos ou AUVs [Fig.2.1] (Autonomous Underwater Vehicles) são veículos submarinos de exploração/investigação marítima impulsionados por sistemas de propulsão e controlados por um computador de bordo, sendo capazes de realizar trajetórias tridimensionais [4]. As capacidades destes veículos estão interligadas com a forma geométrica da sua estrutura e dos seus sistemas de propulsão e controlo, sendo importante otimizar ambos para obter melhores prestações.

O projeto dos AUVs é uma tarefa exigente sendo importante ter em conta os requisitos impostos ao veículo:

- objetivos das missões;
- profundidades de trabalho (pressões aplicadas);
- trajetórias a realizar;
- manobrabilidade desejada; entre outras.

No estudo do controlo da posição espacial é importante analisar o impacto do design de:

- Metodologias de Controlo e Posicionamento;
- Sistemas de Movimentação vertical;
- Estrutura e materiais.

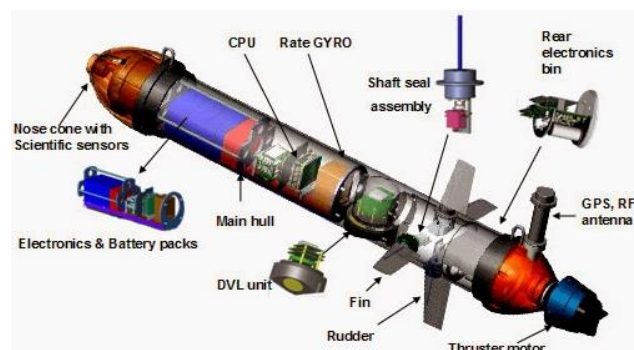


Figura 2.1 - AUV e os seus diversos possíveis componentes

Na exploração de cada um destes tópicos apresentamos as soluções mais pertinentes da indústria, acompanhado com exemplos para contextualização.

### 2.1.1 Metodologias de Posicionamento e Controlo

Os AUVs presentes na indústria exibem múltiplas construções, demonstrando uma grande liberdade de design que lhes permitem adaptar a diferentes tarefas. Esta variedade resulta numa abundância de equipamentos e sistemas associados aos AUVs que no âmbito desta dissertação é necessário enumerar de modo a compreender as particularidades de cada solução.

Os equipamentos associados aos AUVs podem cumprir uma panóplia de funções, mas estes enquadram-se sempre numa de duas vertentes de funcionamento dos AUVs: **Movimentação** ou **Exploração**. Os equipamentos de Movimentação (ex: sistemas de variação de lastro, sistemas de propulsão, etc.) destinam-se à estabilidade e deslocamento do AUV pelo espaço tridimensional, de forma a conseguir realizar a tarefa principal de Exploração. Os equipamentos de Exploração (ex.: câmaras, sistemas de recolha de amostras, etc.) focam-se na tarefa principal das missões, que normalmente consistem na recolha de dados e amostras. Para além destas duas vertentes existem equipamentos regulação ou controlo (ex.: baterias, medidores de pressão, giroscópios, etc.) que complementam os outros equipamentos. Nesta dissertação focar-nos-emos nos Equipamentos de Movimentação e os seus sistemas periféricos de controlo.

#### Metodologias

A movimentação de um AUV é definida segundo duas metodologias: Metodologias de posicionamento e metodologias de controlo.

As metodologias de posicionamento correspondem às formas de impulsão que o veículo é capaz de realizar, dependendo dos diversos equipamentos de propulsão aplicados. Nos AUVs existem enúmeras metodologias, sendo difícil catalogá-las a todas no presente documento. Para simplificar este passo abordamos as 3 metodologias mais comuns dos AUVs:

- **Impulsores** – aplicação de impulsos vetoriais ao veículo, impulsionando-o na direção do vetor [10]. Estes sistemas são os mais comuns devido a permitirem o movimento em qualquer direção, seja no caso em que o sistema esteja alinhado com a direção pretendida, seja através do uso auxiliar de lemes.

Exemplos de sistemas de propulsão: Hélices; Jatos de água, etc.

- **Variação da flutuabilidade** – controlo da flutuabilidade do veículo através da variação da relação volume/massa do veículo. A redução do volume ou a adição de massa cria flutuabilidades negativas que levam o AUV a descer, sendo que uma atuação inversa cria o efeito oposto [11]. Estes sistemas são utilizados tradicionalmente nos veículos aquáticos de superfície como sistemas de estabilização do casco. No caso dos AUVs são ferramentas indispensáveis no controlo da movimentação vertical.

Exemplos de sistemas de variação de lastro: Reservatórios de lastro; Bexigas de óleo, Geradores hidráulicos acionados termicamente, etc.

- **Variação do centro de gravidade** – alteração da trajetória do veículo através do deslocamento de uma massa de posição variável instalada no interior do veículo [1]. Estes sistemas possuem rendimentos elevados e são utilizados nos AUVs como métodos económicos para a alteração da trajetória do veículo.

Exemplos de sistemas de variação do centro de gravidade: Pesos internos de posição variável; reservatórios variáveis descentrados, etc.

As metodologias de controlo consistem nos métodos de controlo implementados nos sistemas de propulsão indicados acima. As soluções aplicadas podem ser divididas em duas secções: na Teoria de Controlo (“Modern Control”[12]) (consistindo na análise teórica do sistema e estudo do comportamento desejado a obter); e nas Tecnologias de Controlo (ex.: Sistemas de válvulas em sistemas hidráulicos) (sendo estes os sistemas físicos que executam o controlo definido/desejado pela Teoria de Controlo). Estas duas secções são aplicadas em conjunto, sendo as seguintes relevantes ao nosso estudo:

#### Teoria de Controlo:

- **Teoria de Controlo** – controlo das “saídas” do sistema (no caso desta dissertação a posição do AUV) através da regulação das “entradas” (alimentação dos atuadores), realizado por um controlador definido segundo a dinâmica interna do sistema e dos sistemas de atuação [12].

A teoria reúne diversas técnicas de controlo aplicáveis a uma variedade de situações possuindo assim uma versatilidade de aplicação. No entanto as metodologia de controlo necessitam de ser adaptadas a cada situação, dependendo da forma de atuação e dinâmica dos componentes.

Exemplo de Metodologias de Controlo: Malha fechada simples; Controlador PID; Controlador LQR; etc.

#### Tecnologias de Controlo:

- **Sistema de controlo elétrico** – controlo de sistemas alimentados eletricamente através de sistemas mecânicos reguláveis, digitais ou programáveis. Estes sistemas de controlo são os mais utilizados na indústria, funcionando através da utilização de eletrónica de potência para controlo da tensão ou corrente de forma a obter um comportamento desejado.

Exemplo de Sistemas de Controlo elétrico: reóstatos (para regulação de temperatura em resistências térmicas); PLCs programáveis; etc.

- **Sistemas de controlo hidráulico** – controlo do caudal e direção do seu fluxo em sistemas hidráulicos [13]. Utilizando normalmente válvulas e bombas reguláveis estes sistemas de controlo são por sua vez habitualmente controlados pelos sistemas acima mencionados.

Exemplo de Sistemas de Controlo hidráulico: Servoválvulas; Bombas de caudal regulável; etc.



### 2.1.2 Sistemas de Movimentação vertical

O deslocamento espacial é um ponto importante durante o design de qualquer veículo, tendo uma importância acrescida nos veículos submarinos e aéreos devido à necessidade de deslocamento tridimensional. Este ponto sozinho é uma área de estudo vasta envolvendo: desenvolvimento de trajetórias tridimensionais; capacidade de perseguir pontos alvo; manobrabilidade; atuação controlada e paralela de vários atuadores em simultâneo; entre outros temas [1].

Esta dissertação foca-se na abordagem do problema de aproximação dos AUVs a plataformas de docagem. Mas devido à complexidade envolvida no deslocamento espacial optou-se por simplificar o problema restringindo-o ao deslocamento vertical, onde se encontram os maiores obstáculos de controlo, como iremos identificar neste capítulo, devido aos diversos sistemas de variação de lastro utilizados nos AUVs.

#### Posicionamento vertical

O posicionamento vertical numa coluna de água é um ponto fulcral no funcionamento de qualquer veículo submarino. Para além da sua relevância na execução das trajetórias do veículo o controlo da posição vertical é importante relativamente à sua integridade estrutural, devido às pressões sofridas a altas profundidades. O controlo é realizado segundo os diversos mecanismos de movimentação vertical, tendo todos os veículos submarinos pelo menos um destes sistemas.

Os sistemas de movimentação vertical podem ser divididos em 2 categorias: sistemas dinâmicos e estáticos [14].

Os sistemas dinâmicos permitem a aceleração direcional do veículo, proporcionando o deslocamento em qualquer sentido. Enquanto energeticamente mais dispendiosos, estes sistemas proporcionam acelerações mais rápidas, permitindo uma melhor reação às variações na posição. Estes consistem em atuadores como: Hélices e Jatos de água [10].

Os sistemas estáticos funcionam através da variação do volume ou peso do veículo, permitindo somente o deslocamento vertical. Esta limitação é compensada pelos elevados rendimentos energéticos apresentados por estas soluções, fazendo com que sejam as soluções mais adotadas na indústria. Estes consistem em sistemas de variação de lastro como: Reservatórios de Lastro e Bexigas de Óleo. À parte estes dois sistemas de variação de lastro convencionais (lastro líquido) começam a surgir, na literatura, estudos que recorrem à utilização de Geradores termoeletrônicos [15] para controlo de posição.

### 2.1.2.1 Sistemas dinâmicos - Atuadores:

#### ○ Hélices

As hélices [Fig.2.2] são uma das soluções de atuação mais utilizadas nas embarcações de superfície e submersíveis. São atuadores extremamente fiáveis, flexíveis e de fácil acesso. Isto deve-se à simplicidade da sua construção e controlo.

A propulsão fornecida por estes atuadores está relacionada com dois aspetos do seu design: a velocidade de rotação e o tamanho e forma das pás.

Os sistemas de hélices habitualmente aplicados aos AUVs são acionados por motores elétricos, devido ao seu baixo índice de poluição e compatibilidade energética. Este acionamento permite o controlo preciso da velocidade, tornando acessível a regulação da propulsão durante o seu funcionamento.

Por outro lado o tamanho e a forma das pás são dois parâmetros fixos para cada solução, afetando toda a sua gama de funcionamento. Muitas considerações condicionam o dimensionamento destes elementos, sendo necessário ter em conta: pás de maiores dimensões, de forma geral, permitem maiores propulsões a custo de maior potência; pás menores proporcionam melhor manobrabilidade a baixas velocidades.



Figura 2.2 - Hélices de um AUV.

Tabela 2.1 - Vantagens e Desvantagens do uso das hélices em AUVs.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Boa fiabilidade e flexibilidade</li><li>○ Boa gama de velocidades (dentro de rendimentos moderados)</li><li>○ Reversibilidade de sentido</li><li>○ Acessibilidade</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Baixa manobrabilidade a baixa velocidade</li><li>○ Baixa aceleração</li><li>○ Consumo energético moderado</li></ul>

○ **Jatos de água**

Os sistemas de jatos de água [Fig.2.3] utilizam bombas hidráulicas de êmbolos para pressurizar água, de modo a ser projetada a altas velocidades, em jato, através de bocais. Estes sistemas não são frequentemente adotados em AUVs, sendo preteridos a favor das hélices. No entanto estes atuadores possuem certas vantagens e desvantagens em relação às suas alternativas, sendo importante perceber as suas aplicações no design destes veículos.

Normalmente utilizados como propulsão principal em veículos de superfície que necessitam de altas velocidades e boa manobrabilidade, os jatos de água, no caso dos AUVs, são utilizados principalmente de forma complementar a outros meios de propulsão. Isto deve-se aos baixos rendimentos apresentados mesmo que permitindo elevadas acelerações, o que torna os jatos de água insustentáveis como principal sistema de propulsão para veículos de pequena a média dimensão [10].

No entanto, estes atuadores podem assumir um importante papel auxiliar no que toca à manobrabilidade do veículo. Através da atuação por impulsos, em que curtos jatos de água são projetados, consegue-se realizar pequenos ajustes no movimento (semelhante ao funcionamento dos propulsores pneumáticos dos equipamentos espaciais). Este método de funcionamento permite a realização de diferentes tarefas, tais como: correção da rota do veículo, pequenos ajustes na posição, e correção da orientação e rotação [10][16].

Relativamente ao uso dos jatos de água ao invés das hélices é importante salientar as seguintes situações:

- Na estabilização de um corpo, ou aproximação de um ponto a baixa velocidade, as hélices apresentam certas dificuldades. Isto deve-se ao seu método de funcionamento, onde a propulsão por estas conferida está dependente da velocidade a que o veículo circula. Por isso estando a circular a baixa velocidade, o controlo que as hélices conferem também é reduzido.[10]
- No uso militar dos AUVs uns dos requisitos mais importantes são a alta manobrabilidade, alta velocidade e o baixo ruído. O uso de hélices torna-se desaconselhado nesta aplicação devido à sua baixa manobrabilidade a baixas velocidades e o ruído produzido a altas velocidades devido à cavitação nas pás das hélices. [10]



Figura 2.3 - Jato de água.

Tabela 2.2 -Vantagens e Desvantagens do uso dos jatos de água em AUVs.[16]

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Boa flexibilidade</li><li>○ Altas acelerações</li><li>○ Bom rendimento a altas velocidades</li><li>○ Boa manobrabilidade</li><li>○ Baixo ruído</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Consumo energético elevado</li><li>○ Equipamento de custos elevados</li><li>○ Soluções de médias a grandes dimensões</li><li>○ Modelação complexa</li></ul>

### 2.1.2.2 Sistemas estáticos – Sistemas de variação de lastro:

A variação de lastro surgiu na Antiguidade como solução à instabilidade dos navios. Utilizando lastro sólido (sacos de pedras, caixas de rações, etc.) era conseguido o controlo da posição vertical do centro de gravidade do navio relativamente à superfície da água.

Com a evolução das tecnologias surgiram novos sistemas de controlo de lastro [13], aplicáveis a veículos submarinos, permitindo o controlo da posição vertical.

O controlo da flutuabilidade, como iremos apresentar de seguida, é realizado através da alteração do peso ou do volume do AUV.

---

#### Gliders

Estes veículos são um género de AUV que utiliza sistemas de variação de lastro em conjunto com asas e lemes para transformar o movimento vertical em movimento horizontal. Isto é conseguido através de movimentos cíclicos de subida e descida, por parte dos sistemas de variação de lastro que, ao serem realizados, aplicam escoamentos nas asas do veículo criando forças horizontais, propulsionando o AUV para a frente [15]. Este ciclo de funcionamento é aprofundado na secção “Thermal gliders”.



Figura 2.4 - Glider (SLOCUM) [20].

---

Antes de enumerar os Sistemas de variação de lastro é importante ter em consideração que estes sistemas funcionam segundo o controlo da flutuabilidade do veículo em relação à densidade do fluido em que estão imersos. No caso dos AUVs, a variação da densidade da água pode ocorrer devido a diversos fatores: temperatura, salinidade e profundidade. [11]

○ **Reservatórios de lastro (água)**

Os reservatórios de lastro são o sistema de controlo de posição vertical mais utilizado nos veículos submarinos. Inicialmente utilizados em veículos aquáticos de superfície, estes sistemas foram adaptados às necessidades de posicionamento vertical dos submarinos.

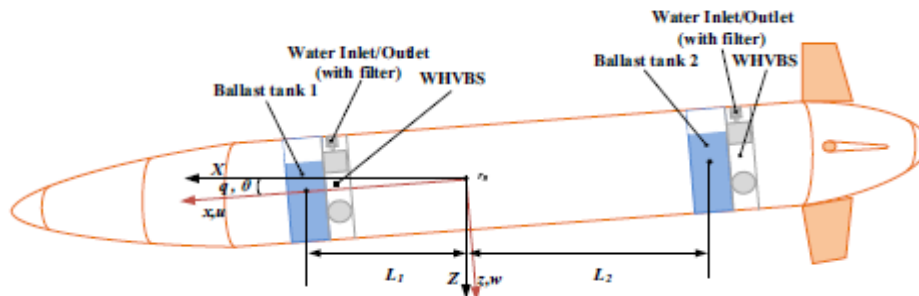


Figura 2.5 - Esquema do posicionamento de Reservatórios de lastro (Ballast tanks – a azul) num AUV [13].

Estes sistemas controlam a flutuabilidade do veículo e, por conseguinte a sua posição vertical, através da gestão do volume de água (lastro líquido) dentro dos seus reservatórios. Tendo estes vazios, o veículo adquire uma flutuabilidade positiva permitindo-lhe subir, a velocidade máxima. Caso estejam cheios, este adquire uma flutuabilidade negativa fazendo o descer, a velocidade máxima.

Existem diversas variações de sistemas de reservatórios de lastro, mas normalmente são constituídos por dois reservatórios associados a bombas hidráulicas e operados segundo um dos seguintes sistemas de controlo [13][17]:

- **Controlo On-Off:** Este tipo de controlo é o mais comum devido à sua simplicidade de aplicação. O enchimento dos reservatórios é feito através da abertura de comportas, normalmente enchendo o reservatório totalmente. Enquanto o esvaziamento é realizado pelas bombas já indicadas, também sem qualquer regulação do fluxo de água.  
Este tipo de solução também pode ser realizada utilizando um sistema de ar comprimido para extrair água dos reservatórios, em vez das bombas [18,19]. Esta solução alternativa permite a redução de custos nas bombas e uma maior velocidade de atuação, mas reduz substancialmente a longevidade das missões dos AUVs devido à necessidade do reabastecimento do reservatório de ar comprimido.
- **Controlo por Servo-válvulas:** Um sistema de electroválvulas ou servo-válvulas é o próximo passo lógico na evolução do controlo de reservatórios de lastro. Este tipo de solução permite o controlo do fluxo de água que sai e entra no reservatório, possibilitando um controlo mais suave da flutuabilidade.  
Nos últimos anos estas soluções têm começado a ser desenvolvidas e aplicadas em casos como o AUV desenvolvido por *Yinshui Liu, XufengZhao, DefaWu, DonglinLi, XiaohuiLi e Mingxing* [13,19]. Infelizmente estes avanços têm sido atrasados devido às características das válvulas disponíveis na indústria: custos elevados, qualidade necessária do fluido de trabalho e tamanho das soluções; são alguns dos obstáculos apresentados pelo ambiente de trabalho dos AUVs.

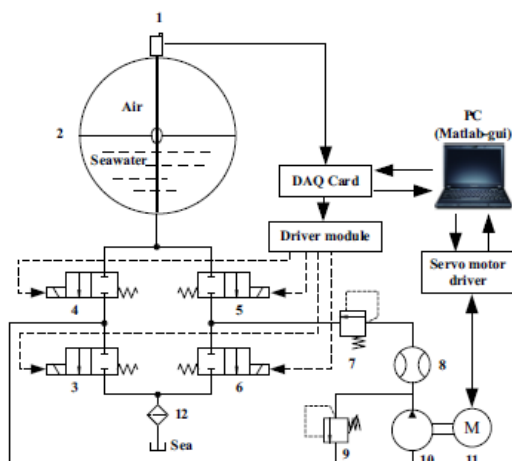


Figura 2.6 - Sistema de válvulas de controlo associadas a um sistema de variação de lastro. [13]

- **Reservatórios de volume variável:** Expandindo sobre o controlo on-off, os reservatórios de volume variável tentam resolver o problema do controlo da flutuabilidade utilizando a variação do volume máximo disponível no reservatório. Prescindindo do controlo do fluxo de água esta solução utiliza o controlo on-off anteriormente referido em paralelo com um sistema de regulação do volume dos reservatórios, normalmente constituído por uma placa que varia de posição no seu interior (tal como refere a solução de Spherical URV de *Bambang Sumantr, Karsiti M.N e Agustawan H da Universiti Teknologi PETRONAS, Malaysia* [17].)

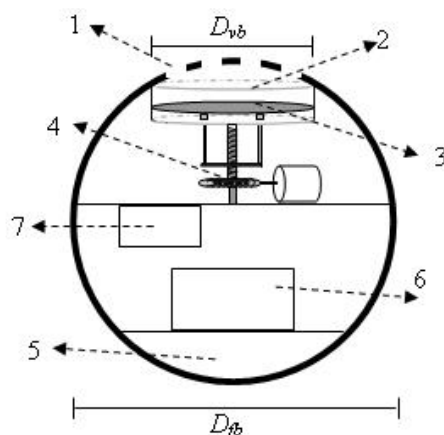


Figura 2.7 - Reservatório de lastro de volume variável. [17]

Estes sistemas de variação de lastro são sistemas de resposta muito lenta e controlo pouco preciso, essencialmente devido às baixas velocidades de enchimento/esvaziamento dos reservatórios. O uso auxiliar de propulsores tem-se tornado prática comum em sistemas que exigem posicionamentos verticais precisos, na tentativa de melhorar as respostas apresentadas.

O uso de reservatórios de lastro deve-se principalmente aos seus baixos consumos energéticos que são essenciais para os AUVs, sendo esta característica particularmente importante em missões a elevadas profundidades ou de grande autonomia.

Tabela 2.3 - Vantagens e Desvantagens do uso de reservatórios de lastro (água) em AUVs

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Altos rendimentos</li> <li>○ Controlo da flutuabilidade</li> <li>○ Fácil acesso ao fluido de lastro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baixas acelerações</li> <li>○ Volume/Peso elevado</li> <li>○ Baixo controlo da posição</li> <li>○ Variação do centro de massa</li> </ul>

### ○ Bexigas de Óleo

As Bexigas de Óleo são uma solução alternativa aos reservatórios de lastro, sendo relativamente menos comuns. Possuindo um processo de funcionamento e controlo semelhantes, é a utilização de óleo o fator que destaca estas duas soluções.

Na aplicação destas soluções é utilizado um reservatório de óleo interno, uma bomba hidráulica e um conjunto de bexigas de óleo externas flexíveis e de volume variável. A bomba permite a circulação do óleo entre o reservatório e as bexigas levando ao enchimento ou esvaziamento destas [5]. O nível de óleo nas bexigas leva à variação do seu volume alterando a impulsão aplicada e por consequente controlando a flutuabilidade.

O controlo deste tipo de soluções é realizado habitualmente através de sistemas de servo-válvulas, já descritos na secção dos reservatórios de lastro. A utilização de servo-válvulas permite uma regulação precisa do fluxo de óleo levando ao bom controlo da expansão e contração das bexigas, tornando esta solução apelativa a AUVs que necessitam muito bom posicionamento vertical. É de notar, no entanto que estes sistemas são passíveis de sofrer perturbações com variação da pressão exterior, devido à diferença de pressão existente entre o exterior e interior das bexigas. Esta diferença de pressão, se não controlada, pode causar o refluxo de óleo das bexigas para dentro dos reservatórios causando graves problemas na descida a profundidades elevadas.

Este sistema de variação de lastro permite soluções mais compactas em troca de maior peso adicionado.

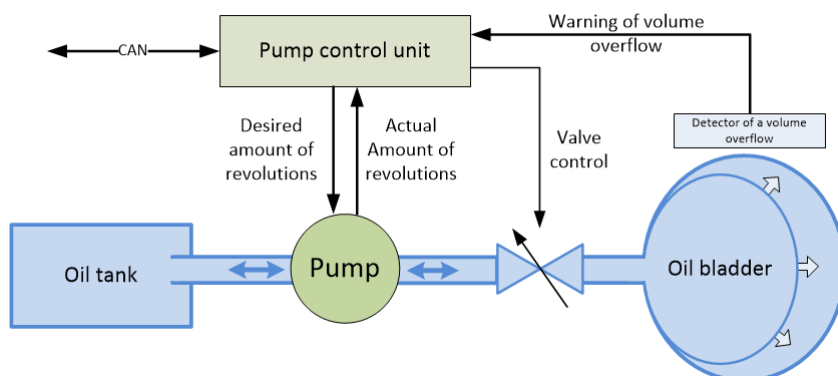


Figura 2.8 - Esquema de um sistema de bexiga de óleo (oil bladder).[10]

Tabela 2.4 - Vantagens e Desvantagens do uso de bexigas de óleo em AUVs.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Altos rendimentos</li> <li>○ Controlo da flutuabilidade</li> <li>○ Soluções mais compactas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Baixas acelerações</li> <li>○ Peso elevado</li> <li>○ Baixo controlo da posição</li> <li>○ Variação do centro de impulsão</li> <li>○ Compromisso entre Flexibilidade e Fragilidade</li> <li>○ Pressão dentro das bexigas sensível à pressão exterior</li> </ul>



- **“Thermal Gliders”** – Geradores hidráulicos acionados termicamente & Geradores termoelétricos

Os *Thermal Gliders* são uma classe de veículos submarinos autónomos tipo *gliders* relativamente atuais, estando ainda em desenvolvimento. Estes *gliders*, impulsionados pelo desenvolvimento do Slocum Thermal [20], , ao contrário dos *gliders* alimentados a baterias, apresentam a particularidade de a sua fonte de energia ser obtida a partir do gradiente térmico existente no oceano. Esta fonte de energia permite o aumento exponencial da sua autonomia, em troca de uma redução no controlo do posicionamento.

Os *Thermal Gliders* utilizam geradores hidráulicos acionados termicamente como sistemas de variação de lastro, tendo um funcionamento semelhante ao das Bexigas de óleo referidas anteriormente (controlando a flutuabilidade do veículo através da variação do volume do material dentro das bexigas).

Apesar de apresentarem elevado potencial para serem massivamente utilizados na exploração oceânica, os *Thermal Gliders* ainda apresentam uma ampla margem de otimização, designadamente no gerador hidráulico acionado termicamente e no dimensionamento das áreas de transferência de calor.

Paralelamente a estes sistemas a integração de geradores termoelétricos, nos *Thermal gliders*, tem sido desenvolvida devido a proporcionar uma fonte de energia auxiliar ao veículo.

Ambos os geradores necessitam de condições de funcionamento particulares, mas fornecem vários benefícios em termos de autonomia que os pode tornar no futuro dos AUVs. Por esta razão são identificados de seguida cada um destes geradores:

---

### **Geradores hidráulicos acionados termicamente**

Os geradores hidráulicos acionados termicamente são sistemas de variação de lastro semelhantes aos das Bexigas de óleo, onde a variação da flutuabilidade do veículo é controlada através da variação de volume. Estes sistemas distinguem-se, das Bexigas de óleo, pelo uso de materiais de mudança de fase (como por exemplo: a parafina, o etilenoglicol, etc.) que servem ao mesmo tempo de lastro e sistema de acionamento hidráulico.

Os materiais de mudança de fase apresentam variações substanciais de volume durante a mudança de fase sólido-líquido, permitindo assim cumprir a função de lastro de volume variável. Mas o que os torna interessantes nesta área são as suas temperaturas de mudança de fase que, estando dentro da gama de temperaturas à superfície da terra, permitem o desenvolvimento de um sistema de lastro de volume variável acionado termicamente. O processo de mudança de fase tem por base uma reação térmica, ao contrário do acionamento hidráulico dos 2 outros sistemas, tornando necessário uma fonte de energia térmica em vez de bombas hidráulicas.

No caso dos *Thermal Gliders* é utilizado o gradiente térmico do oceano como fonte de energia, sendo a mudança de fase provocada através da descida das temperaturas ao longo da profundidade do oceano. Este processo permite o controlo da posição vertical a rendimentos energéticos elevados, em troca de um baixo controlo da posição (sendo estas as principais razões da aplicação atual destes geradores restrita aos *Thermal Gliders*).



Para compreender melhor o funcionamento interno dos geradores hidráulicos acionados termicamente analisamos de seguida o exemplar desenvolvido para o *Slocum Thermal* [20,21]:

- **Composição do sistema hidráulico**

O sistema de variação de lastro desenvolvido para o *Slocum Thermal* é composto pelos seguintes componentes:

- duas bexigas de óleo (uma exterior e outra interior),
- um acumulador hidráulico com azoto,
- um reservatório com o material de mudança de fase em contacto com o fluido hidráulico através de uma membrana,
- uma válvula direcional de 3 vias e 2 válvulas de retenção [15][Fig.2.9].

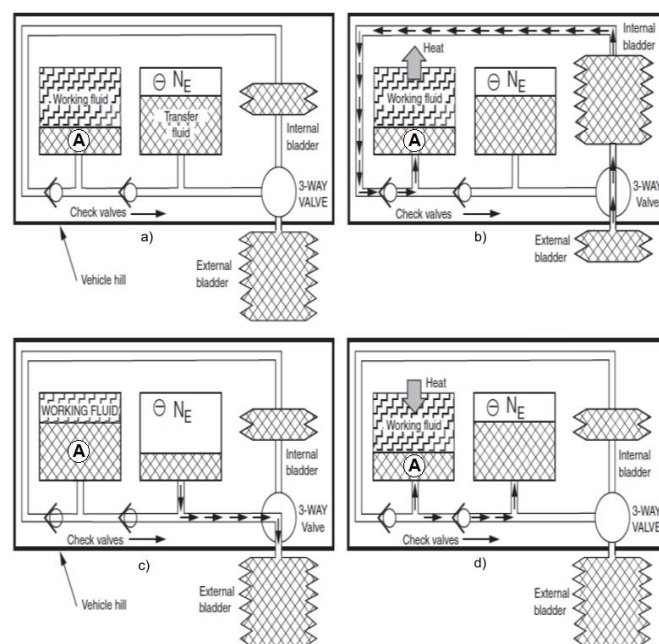


Figura 2.9 - Esquema de um sistema hidráulico termicamente acionado.

### Funcionamento do sistema hidráulico

Os geradores hidráulicos acionados termicamente possuem um funcionamento cíclico, criando um movimento de oscilação vertical. Tal como os *gliders* convencionais a utilização de asas e lemes permite transformar este movimento de oscilação vertical num movimento horizontal, resultando em trajetórias em dentes de serra típicas dos *gliders*.

Um ciclo de funcionamento do sistema do *Slocum Thermal* pode ser dividido nas seguintes etapas [15,21]:

- O AUV estando à superfície o material de mudança de fase encontra-se no estado líquido e a bexiga exterior expandida [Fig.2.9.a)]. Para iniciar a descida a válvula é acionada permitindo o óleo no interior da bexiga exterior escoar para a bexiga interior, devido à diferença de pressão entre as duas bexigas [Fig.2.9.b)]. Estando a bexiga exterior contraída o AUV possui uma flutuabilidade negativa permitindo o início da descida;

- Durante a descida o material de mudança de fase começa a arrefecer. Quando o AUV atinge uma profundidade onde a temperatura é baixa o suficiente é realizada a mudança de fase líquido-sólido. Esta mudança de fase contrai o material de mudança de fase permitindo a sucção do óleo da bexiga interior para o reservatório [Fig.2.9.b)];
- No fundo do mar o AUV encontra-se com o material de mudança de fase no estado sólido e a bexiga exterior contraída. Para iniciar a subida a válvula é acionada permitindo o óleo do acumulador escoar para dentro da bexiga exterior [Fig.2.9.c)]. Estando a bexiga exterior expandida o AUV possui uma flutuabilidade positiva permitindo o início da subida; Encontrando-se o material de mudança de fase no estado sólido o veículo obtém uma flutuabilidade positiva permitindo a subida;
- Durante a subida o material de mudança de fase começa a aquecer. Quando o AUV atinge uma altitude onde a temperatura é alta o suficiente é realizada a mudança de fase sólido-líquido. Esta mudança de fase expande o material de mudança de fase transferindo o óleo do reservatório para o acumulador [Fig.2.9.d)]. Com esta última etapa o ciclo recomeça;

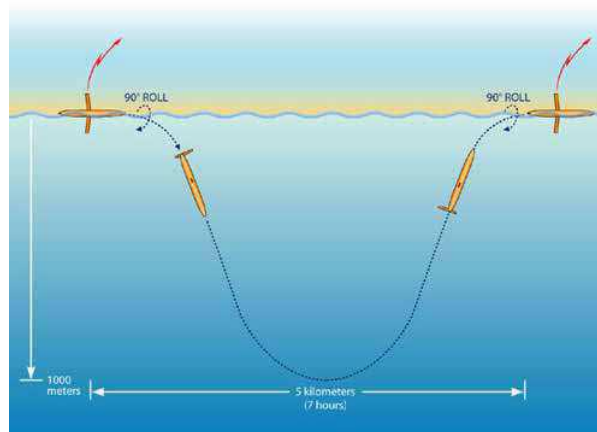


Figura 2.10 - Esquema da trajetória realizada por um *Glider*.

O material de mudança de fase escolhido é uma característica de extrema importância para a forma do funcionamento do AUV. Diferentes materiais possuem diferentes variações de volume e diferentes temperaturas de mudança de fase. O estudo e análise destas duas características é essencial, pois:

- A variação de volume define a relação massa-volume para o controlo da flutuabilidade. Esta relação permite definir a massa de material necessária para o funcionamento correto do AUV;
- As temperaturas de mudança de fase definem as profundidades de mudança de direção do movimento em dente de serra. Os ciclos de funcionamento dependem destas profundidades, influenciando a altura e largura dos dentes de serra das trajetórias do *glider* [Fig.2.10] (estas temperaturas podem ser controladas alterando o material utilizado ou utilizando sistemas interiores de controlo de temperatura);

---

## Geradores termoelétricos

Os geradores termoelétricos têm como objetivo servir de fonte de energia auxiliar para os AUVs. Estes geradores utilizam pares de semicondutores para criar diferenciais elétricos através do gradiente térmico do oceano, gerando energia elétrica que é depois redirecionada para as baterias ou para os diferentes equipamentos de exploração.

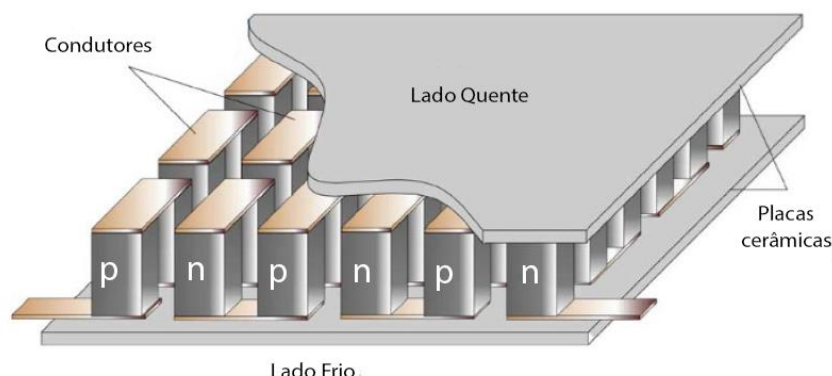


Figura 2.11 - Módulo de um gerador termoelétrico

Os geradores termoelétricos são compostos por pares de semicondutores entre duas placas cerâmicas ligadas a uma bateria [Fig.2.11]. No caso dos AUV uma das placas encontra-se em contacto com o ambiente exterior e a outra em contacto com uma massa térmica, criando um diferencial de temperaturas entre as extremidades dos semicondutores. É a partir deste diferencial de temperaturas que os semicondutores geram uma diferença de potencial através do efeito de Seebeck [22]. Paralelamente a este efeito ocorre o efeito de Peltier [22] que equilibra a temperatura da massa térmica com a do exterior ao longo do processo de geração de energia elétrica.

As trajetórias em dente de serra dos gliders, em conjunto com os dois efeitos indicados, permitem a geração constante de energia elétrica.

O rendimento do processo realizado pelos geradores termoelétricos é regido por duas características: o aumento da diferença das temperaturas das extremidades dos semicondutores aumenta a diferença de potencial registada; massas térmicas com maiores capacidades térmicas permitem gerar um maior potencial de energia durante a variação da sua temperatura.

É de notar que a capacidade térmica, o volume e a densidade da massa térmica utilizada vão influenciar a viabilidade do processo. Caso os materiais de mudança de fase utilizados nos geradores hidráulicos acionados termicamente possuíssem características promissoras estes podem ser utilizados como massa térmica já que desempenham o mesmo ciclo de trabalho.

## Controlo da posição vertical

O controlo da posição vertical dos *Thermal Gliders* é muito reduzido, isto deve-se à limitada interação possível com os sistemas de movimento indicados. Ambos os geradores dependem do movimento cíclico da posição/temperatura tendo mecanismos sistemáticos que não permitem alcançar posições exatas desejadas:

- No caso do sistema hidráulico descrito, o controlo da posição depende de duas componentes: características do material de mudança de fase e o sistema de válvulas on-off; estando ambas ligadas ao ciclo de trabalho definido previamente.

Para ultrapassar este problema de controlo de posição pode-se recorrer à implementação dos sistemas de movimentação já referidos anteriormente como sistemas auxiliares:

- Propulsores (hélices, jatos de água, etc.), para ajuste rápido da posição/rota.
- Tanques de lastro, para lançamento e recolha a baixo custos energéticos.

Tabela 2.5 - Vantagens e Desvantagens do uso de Geradores hidráulicos acionados termicamente em AUVs.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>○ Rendimentos elevados</li><li>○ Fonte de energia de fácil acesso (Gradiente térmico do oceano)</li><li>○ Equipamento de baixo custo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>○ Velocidades de atuação reduzidas</li><li>○ Trajetórias inflexíveis</li><li>○ Funcionamento dependente do ambiente</li><li>○ Baixo controlo da posição</li></ul>

### 2.1.2.3 Outros sistemas

Nesta secção irão ser abordados os sistemas auxiliares dos sistemas dinâmicos e estáticos. Estes sistemas complementam os métodos de movimentação do AUV fornecendo maior controlo ou outras capacidades de movimentação.

É de notar que estes sistemas não possuem propulsão própria necessitando sempre de um sistema de movimentação principal para serem capazes de executarem a sua função.

#### ○ Lemes

Os lemes são dispositivos que surgiram na Antiguidade para o controlo da orientação das embarcações. Estes sistemas consistem num objeto em forma de folha capaz de ser direcionado [Fig.2.12], que permite redirecionar o fluxo de água propulsionado por sistemas dinâmicos.

Os lemes são normalmente associados a hélices ou jatos de água de modo a permitir a rotação do veículo. No caso dos jatos de água existem mesmo lemes especiais que permitem a inversão do sentido do jato [Fig.2.3].

#### ○ Asas

As asas [Fig.2.12] dos AUVs, tal como as asas dos aviões, funcionam através da criação de sustentação, segundo a forma da asa e a velocidade relativa entre o veículo e o meio. No caso dos AUVs a força de sustentação gerada depende também da densidade da água envolvente.

O uso de asas em AUVs possui duas vertentes: estabilização e propulsão.

- A vertente de estabilização é a mais comum, pois permite estabilizar um AUV com sistemas de propulsão não simétricos e forças exteriores indesejadas.
- A vertente de propulsão segue a mesma metodologia de funcionamento que as asas dos aviões onde a forma das asas gera uma força de sustentação que impulsiona o veículo em frente. Esta vertente é comum nos *gliders* sendo através destas que este tipo de AUV consegue avançar.



Figura 2.12 - Leme e Asas de um AUV.

### ○ Massas internas móveis

Sistemas de Massas internas móveis são comuns em *Gliders* devido a permitirem rotação transversal do veículo sem grandes gastos energéticos. Estes dispositivos funcionam através do deslocamento de massas ao longo do eixo de rotação do glider variando a posição do centro de massa, criando assim a rotação do corpo [Fig.2.13].

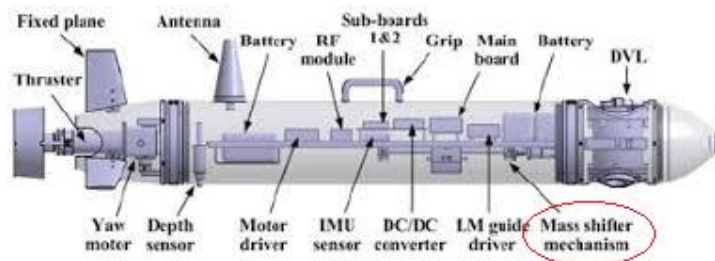


Figura 2.13 - Diagrama de um AUV com um sistema de massas internas móveis.

### 2.1.3 Estrutura e Materiais

Os ambientes de trabalho dos AUVs apresentam diversas condições hostis: pressões elevadas, temperaturas baixas, exposição a água salgada, entre outras. Estas condições, em conjunto com as necessidades para o funcionamento do AUV: flutuabilidade, forma hidrodinâmica e acomodação dos equipamentos; tornam o design da estrutura e escolha dos materiais de extrema importância. Para além destes pontos é importante ter em conta os custos envolvidos, havendo sempre a possibilidade de perda ou danos ao AUV.

#### Estrutura

Na conceção estrutural dos AUVs têm de ser tidos em conta os fatores que definirão a sua eficiência atendendo ao fim a que se destinam e as missões a levar a cabo.

Habitualmente as principais características sobre as quais recaem particular atenção são a forma hidrodinâmica, o peso e volume e o suporte para os diversos equipamentos [23].

Da conceção da forma e inerente hidrodinâmica resultarão as forças de arrasto a que o veículo estará sujeito durante o seu deslocamento. Tais forças, em conjunto com o peso e volume, irão condicionar a manobrabilidade do veículo.

Por fim, tendo em conta os objetivos últimos das missões a levar a cabo, deverão ser previstos os espaços e suportes para os equipamentos necessários.

#### Estruturas mais comuns

Habitualmente, as condicionantes hidrodinâmicas conduzem a veículos com a forma de Torpedo [Fig.2.14]. No entanto esta forma não corresponde necessariamente à melhor solução para a manobrabilidade.



Figura 2.14 - AUV em forma de torpedo (REMUS).

Outra opção posta em prática é a de uma forma de paralelepípedo, tipo caixa, onde se valoriza o acondicionamento dos equipamentos e manobrabilidade em detrimento da forma hidrodinâmica.

## **Materiais**

Particular atenção deverá ser dada igualmente à opção de materiais a empregar na construção do veículo em si. As características inerentes dos próprios materiais, tais como a densidade, resistência mecânica e à corrosão, terão de assegurar o bom desempenho nas condições ambientais adversas e a duração de vida útil do veículo.

Sendo o peso um dos fatores estruturais a ter em conta, a densidade dos materiais escolhidos tem influência direta sobre a flutuabilidade (impulsão) e manobrabilidade.

Tendo em conta as condições adversas de utilização, a resistência mecânica global deverá suportar as elevadas pressões a que o AUVs estará sujeito no desempenho das missões, bem como apresentar resistência à corrosão (devido à salinidade e outros fatores químicos ambientais) e detritos.

### Materiais comuns

Habitualmente a escolha dos materiais a utilizar recai sobre **cerâmicos**, **plásticos** ou **liga metálicas** [23]. A seleção do material a utilizar depende do elemento estrutural a que se destina, sua função e condições ambientais e de utilização.

No casco exterior utilizam-se, norma geral, plásticos ou cerâmicos (dando prioridade à resistência à corrosão), ou metais inoxidáveis ou com revestimento anticorrosivo (dando prioridade à resistência mecânica).

Na parte interior do veículo é necessário garantir a estabilidade estrutural (evitando o colapso sob efeito das elevadas pressões), a estanquicidade dos equipamentos e o seu correto posicionamento. No caso de o casco exterior ser constituído por metal, dada a sua rigidez, poder-se-á optar por um preenchimento tipo **espuma de poliuretano**, que garante facilmente o posicionamento dos equipamentos, adicionando uma acréscimo estrutural. Por outro lado, no caso de o casco ser constituído por materiais plásticos ou cerâmicos, por vezes torna-se necessário tomar a opção de garantir a estanquicidade de cada equipamento individualmente, e preencher o restante espaço vazio com um fluido hidráulico, favorecendo assim uma mais eficiente distribuição dos esforços resultantes das pressões exteriores [23].



## 2.2 Estações de docagem

Se no caso dos veículos os condicionamentos estruturais e hidrodinâmicos tendem a uniformizar as soluções, no caso das estações de docagem, isentas desses condicionalismos, a indústria propõe um sem número de soluções igualmente válidas.

No entanto, existem requisitos obrigatórios a serem cumpridos em todas elas: possuir um sistema de acoplamento e sistemas de georreferenciação.

Como referido anteriormente a finalidade destas estações é a de recarregar as baterias dos AUVs, aumentando a sua autonomia e duração das missões, possibilitando ainda a recolha e transmissão de dados.

### 2.2.1 Estruturas e Sistemas de acoplamento

Estruturalmente as estações devem estar concebidas de forma a acomodar o tipo e dimensão dos veículos a servir, e dispor de plataformas adequadas ao seu suporte em fase de docagem.

A título de exemplo da diversidade estrutural das soluções disponíveis, enumeramos os seguintes tipos de estações de docagem [23]:

- tipo jaula [Fig.2.15 e 2.18];
- tipo barra de fixação [Fig.2.16];
- cabo de amarração [Fig.2.17]
- plataforma horizontal [Fig.2.19], sendo este último caso o que abordaremos nesta dissertação por corresponder ao caso mais usual.

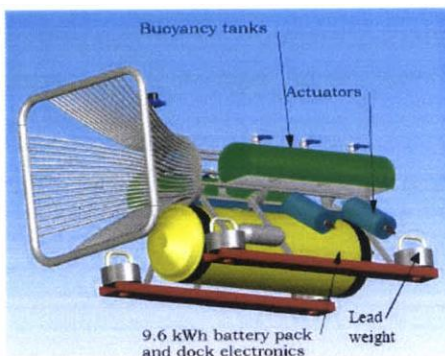


Figura 2.15 - Plataforma de docagem de jaula em forma de cone.

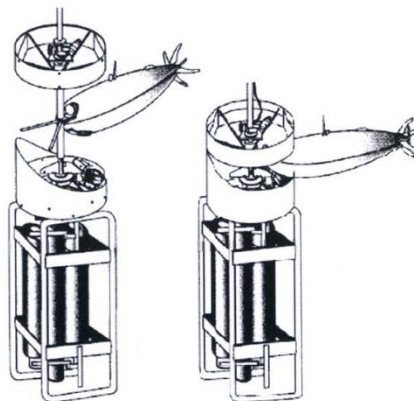


Figura 2.16 - Plataforma de docagem de barra.

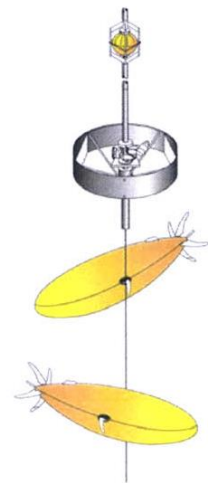


Figura 2.17 - Plataforma de docagem de cabo de amarração.

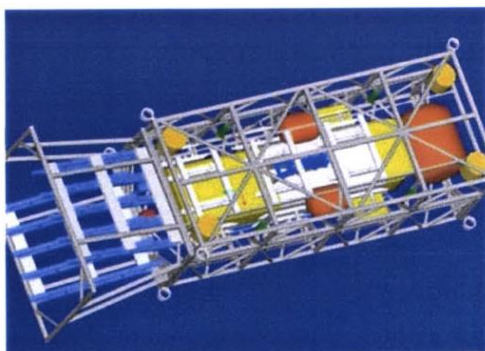


Figura 2.18 - Plataforma de docagem de jaula em forma retangular.

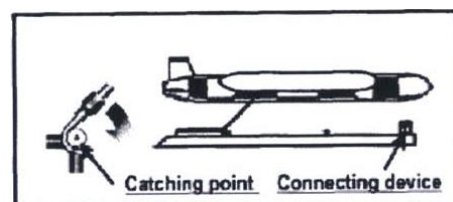


Figura 2.19 - Plataforma de docagem horizontal.



Os sistemas de acoplamento são constituídos por uma sistema de fixação mecânica (tipo pinça ou outro) e um ou mais cabos de reabastecimento elétrico e/ou de transmissão de dados.

Confere-se particular importância aos sistemas automáticos de guiamento em fase de docagem em condições adversas do meio (correntes, impulsão, variações de pressão). Tais sistemas deverão de uma forma autónoma efetuar correções e ajustes de modo a assegurar uma correta docagem e ligação entre o AUV e a estação.

### 2.2.2 Métodos de comunicação e georreferenciação

De entre os sistemas de guiamento durante a docagem os sistemas de **comunicação** (para a transmissão de dados recolhidos e objetivos das missões) e de **georreferenciação** (para assegurar o correto posicionamento do AUV em relação aos alvos da missão e da própria estação) são os sistemas de maior importância. Tais sistemas implicam transmissão de informação com exterior, quer entre o veículo e a estação, quer num âmbito mais alargado (com outras bases de recolha e transmissão de dados).

Para assegurar estas transmissões vários modelos poderão ser formulados:

- A transmissão com o exterior é assegurada pela estação, que por sua vez comunica com o AUV;
- O AUV e a estação comunicam entre si, e ambos comunicam com o exterior;

Entende-se por comunicação o conjunto de dados correspondentes a instruções para a realização da missão, alertas, avisos e dados recolhidos pelo AUV.

No que se refere à georreferenciação o posicionamento do veículo é determinado com recurso a LBL (Long Base Line Navigation, análogo ao sistema de GPS), por posição relativa a elementos fixos conhecidos (balizamento) ou combinação destes dois métodos [23]. Complementarmente o AUV dispõe de um sistema de posicionamento em vazio, que lhe confere a capacidade de navegar e posicionar-se em ambientes irregulares.

A transmissão destes dados, em ambos os sistemas, pode ser do tipo **eletromagnético**, **acústico** ou **luminoso** [23]. No entanto devido à baixa penetração no meio aquático dos sinais luminosos e eletromagnéticos, que os torna pouco viáveis a longas distâncias, frequentemente se opta pelos sinais acústicos que se propagam em condições ideais neste meio.

### 3 Modelos numéricos

Uma vez identificado e caracterizado o âmbito geral da presente dissertação, passamos ao seu objetivo principal, ou seja, o desenvolvimento de um modelo numérico para o estudo do controlo do posicionamento de um AUV durante a aproximação a uma plataforma de docagem.

Para desenvolver este modelo tomou-se como base um AUV com as características mais comuns das anteriormente enumeradas.

Consequentemente, foi estabelecida a seguinte metodologia de estudo:

- Definição do modelo de AUV, segundo suas características, condições e considerações de base do presente estudo.
- Definição das equações dinâmicas com base no modelo estabelecido no ponto anterior.
- Definição do controlador escolhido e as equações de funcionamento dos sistemas de movimentação.
- Construção do modelo no Matlab Simulink e seu teste para vários valores de variáveis de entrada.
- Extração de conclusões a partir dos resultados obtidos do Matlab Simulink.

Nesta metodologia é apresentada a modelação numérica de um AUV com o objetivo de estudar a capacidade de controlo da sua posição vertical. São inicialmente definidos os pontos de estudo do modelo que permitam a definição das características e condições de modelação. Nesta etapa são também realizadas algumas considerações e simplificações necessárias para a construção do modelo.

Segundo as condições definidas são desenvolvidas as equações de movimento do AUV, sendo estas posteriormente simplificadas de forma a restringir o estudo ao controlo do posicionamento vertical.

Uma vez obtidas as equações de movimento foi iniciado o desenvolvimento das equações de funcionamento dos atuadores e dos sistemas de controlo. Sendo estes os seguintes:

#### Atuadores

- Hélices,
- Reservatórios de água,

#### Sistemas de controlo

- Malha Fechada Simples,
- Controlador PD com Feedback da aceleração (Km).

(Uma das metodologias de controlo mais utilizadas na indústria dos AUVs são os controladores LQR (Linear Quadratic Regulator). No entanto, dada a sua complexidade e a infamiliaridade de aplicação por parte do autor, estes controladores não foram considerados na presente dissertação.).

Na secção final deste capítulo os modelos desenvolvidos são implementados em MatLab Simulink e as suas respostas registadas. As respostas foram analisadas e comparadas de modo a serem tiradas as conclusões necessárias sobre o funcionamento de cada solução.

### 3.1 Modelo definido

Conforme os objetivos anteriormente referidos optou-se por um AUV com as seguintes características:

- **Estrutura e forma**

No desenvolvimento do presente modelo não foi definida uma estrutura e forma específica. As variáveis dependentes da geometria do corpo foram propostas dentro de uma gama de valores resultantes da pesquisa realizada, de forma a que o estudo seja mais abrangente, e não restrito a um único modelo.

- **Massa e Volume**

Foram consideradas relações entre massa ( $m$ ) e volume ( $V$ ) coerentes e lógicas para este tipo de veículos.

**Forças de arrasto lineares e não lineares**

Devido a não ter sido definida uma estrutura e forma específica, estas forças tiveram de ser estimadas com recurso aos dados apresentados nos artigos estudados [4][6][8][10][11][13][15][19][20].

- **Sistemas de movimentação**

Dos sistemas de movimentação referidos anteriormente foram selecionados dois sistemas:

- A utilização de hélices, devido ao seu uso corrente na indústria, a capacidade de inversão de sentido de atuação e facilidade de formulação da sua equação de funcionamento.
- A utilização de reservatórios de água, devido também ao seu uso corrente e facilidade de formulação da equação de funcionamento.

- **Sistemas de controlo**

Foram selecionados os seguintes sistemas de controlo tradicional:

- malha fechada simples, e
- controlador PD, com *feedback* de aceleração ( $K_m$ ).

O sistema de malha fechada foi selecionado por corresponder ao modelo de maior simplicidade possível, para poder ser um ponto de referência para o outro sistema de controlo.

O sistema de controlador PD com *feedback* de aceleração ( $K_m$ ) foi escolhido por haver disponível ampla literatura sobre a construção e funcionamento destes controladores.

- **Trajectoria**

Para os testes do modelo, definiu-se sempre uma estação de docagem a uma profundidade maior que a correspondente à posição inicial do veículo. Optou-se por uma trajetória somente vertical e descendente, de forma a simplificar o estudo do controlo da trajetória. Esta condição foi tomada pois é neste eixo que maior parte do impacto do sistema de variação de lastro é sentido, sendo este um dos pontos críticos de controlo.

No presente estudo é objetivo principal obter uma trajetória de aproximação sem ultrapassar o ponto de docagem estabelecido, isto é sem “*overshoot*”, de modo a não existir colisão do AUV com a plataforma de docagem.

- **Forças exteriores**

De forma a simplificar o modelo desenvolvido não foram consideradas forças ambientais (ex: correntes marinhas), perturbações exteriores não constantes (ex: choques) e a oscilação do centro de massa do AUV devido ao enchimento dos reservatórios de água.

### 3.2 Equações de movimento

Nesta secção é apresentado o desenvolvimento das equações de movimento do modelo numérico em causa. Ao longo deste capítulo são apresentados os desenvolvimentos matemáticos para a construção das equações e as devidas considerações tidas durante essa tarefa. Os desenvolvimentos matemáticos e formulações foram desenvolvidos segundo a matéria lecionada no Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FEUP e informação obtida através do livro: Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control indicado na referência [1].

#### **Passo 1** – Definição das características dinâmicas do veículo

O primeiro passo no desenvolvimento das equações de movimento é o reconhecimento das propriedades geométricas e dinâmicas do AUV.

**Consideração nº1** - Devido a haver uma grande variedade de geometrias e modelos de AUVs na indústria considerou-se um modelo sem forma particular apontando somente uma massa ( $m$ ) e um volume ( $V$ ) inerentes ao objeto. Para o cálculo posterior de componentes dependentes da geometria do AUV (como as forças de arrasto) sugeriu-se valores dentro de uma gama aceitável, segundo a massa e o volume dos AUVs apresentadas nos artigos analisados.

$m$  – massa do veículo

$V$  – volume do veículo

## Passo 2 – Definição das referências tridimensionais do modelo

Para a correta modelação de um veículo autónomo é necessária a identificação de dois referenciais [Fig.29]:

- Referencial NED (North East Down)– referencial estático que permite identificar a orientação, a posição e a velocidade absolutas do veículo no espaço;
- Referencial BODY – referencial posicionado no centro de massa do corpo conforme se apresenta na figura 29. Este referencial é utilizado no cálculo das equações de movimento, pois no caso de atuadores lineares estes mantêm a orientação relativa ao corpo facilitando o desenvolvimento das equações. Em contrapartida devido a este referencial ser um referencial relativo é necessário adicionar o efeito das Forças de Coriolis e transformar a velocidade obtida para o referencial NED;

É de notar que em ambos os referenciais o eixo vertical é considerado positivo na descida, sendo que o incremento da variável vertical implica a descida do corpo.

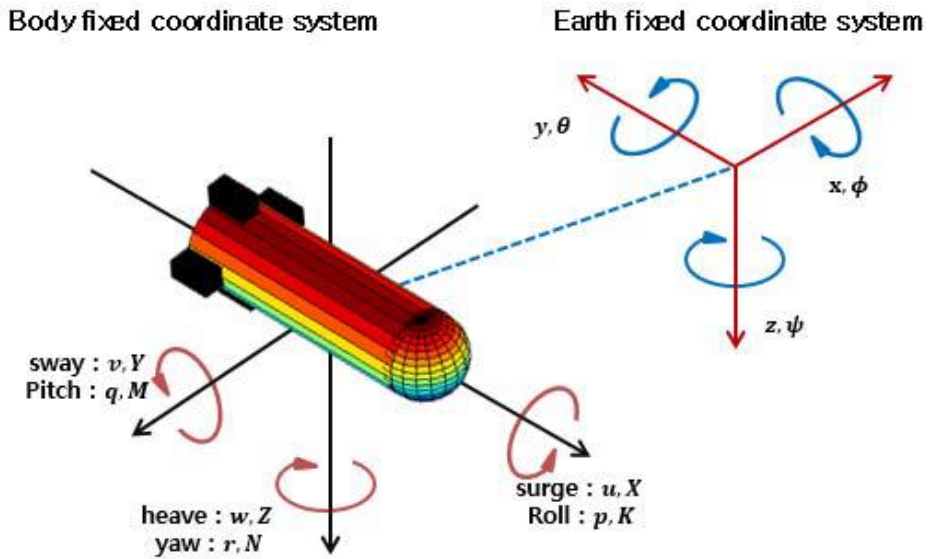


Figura 3.1 - Referenciais definidos: BODY (esquerda); NED (direita)

### Referências:

Vetor de posição no ref. NED:  $\boldsymbol{\eta} = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$  ;

Vetor de velocidade no ref. BODY:  $\boldsymbol{v} = (u, v, w, p, q, r)$  ;

### Passo 3 – Desenvolvimento da equação do movimento do corpo

Para desenvolver a equação do movimento do corpo realizou-se o equilíbrio entre quantidade de aceleração ( $\dot{Q}$ ) e forças exteriores ( $F_{ext}$ ):

$$\dot{Q} = \sum F_{ext} \quad [1]$$

resultando em,

$$(\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A)\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}_{RB} + \mathbf{C}_A + \mathbf{D} + \mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r))\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad [2]$$

Sendo:

- $\mathbf{M}_{RB}$  – Massa inercial do AUV;
- $\mathbf{M}_A$  – Massa adicionada (devido ao meio ambiente aquático);
- $\mathbf{C}_{RB}$  – Coeficientes de Coriolis resultantes da massa inercial do sistema;
- $\mathbf{C}_A$  – Coeficientes de Coriolis resultantes da massa adicionada ao sistema;
- $\mathbf{D}$  – Forças e Binários de arrasto linear;
- $\mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r)$  – Forças e Binários de arrasto não linear;
- $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  – Forças e Binários hidroestáticos resultantes do equilíbrio entre o peso do corpo e a impulsão aplicada;
- $\boldsymbol{\tau}$  – Forças de controlo aplicadas (sistema de movimentação – Hélices e/ou Reservatórios de água controlados por um sistema de controlo)

Como indicado no **Passo 2** é necessário transformar o vetor de velocidade ( $\mathbf{v}$ ) no referencial BODY para o vetor de posição ( $\boldsymbol{\eta}$ ) do referencial NED:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{v} \quad [3]$$

Sendo:

$\mathbf{J}_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta})$  – Matriz de transformação BODY – NED

$$\mathbf{J}_{\boldsymbol{\eta}}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \phi + \cos \varphi \sin \theta \sin \phi & \sin \varphi \sin \phi + \cos \varphi \cos \theta \sin \theta & 0 & 0 & 0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \phi + \sin \varphi \sin \theta \sin \phi & -\cos \varphi \sin \phi + \sin \theta \sin \varphi \cos \theta & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \quad [4]$$

**Passo 4 – Identificação de cada componente da equação de movimento**

- Massa do sistema ( $M_{RB}$  e  $M_A$ ):

As matrizes  $M_{RB}$  e  $M_A$  tratam-se das componentes de inércia do sistema.

Variáveis:

$M_{RB}$  – Massa inercial do AUV;

$M_A$  – Massa adicionada (devido ao meio ambiente aquático);

$m$  – Massa do corpo;

$\eta_g$  – Afastamento do centro de massa do corpo e a origem do referencial BODY;

$\eta_b$  – Afastamento do centro de impulsão do corpo e a origem do referencial BODY;

Sendo:

$$\eta_g = (x_g, y_g, z_g, 0, 0, 0) \quad [5]$$

$$\eta_b = (x_b, y_b, z_b, 0, 0, 0) \quad [6]$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad [7]$$

$$M_A = \begin{bmatrix} X. & X. & X. & X. & X. & X. \\ u & v & w & p & q & r \\ Y. & Y. & Y. & Y. & Y. & Y. \\ u & v & w & p & q & r \\ Z. & Z. & Z. & Z. & Z. & Z. \\ u & v & w & p & q & r \\ K. & K. & K. & K. & K. & K. \\ u & v & w & p & q & r \\ M. & M. & M. & M. & M. & M. \\ u & v & w & p & q & r \\ N. & N. & N. & N. & N. & N. \\ u & v & w & p & q & r \end{bmatrix} \quad [8]$$

As componentes da matriz de Massa adicionada (devido ao meio ambiente aquático) ( $M_A$ ) são definidos segundo a geometria e distribuição da massa do AUV. No entanto devido à complexidade de cálculo destes componentes optou-se por definir gamas de valores para estes, utilizando como referência os valores experimentais apresentados nos artigos científicos indicados [1][4][6][8][10][13][15][19][20].

É de notar que a aproximação destes valores não entra em conflito com o estudo realizado já que o objetivo do modelo em causa é estudar o sistema de controlo da aproximação, não sendo necessário obter respostas específicas para modelos concretos.

**Simplificação:** Caso exista um plano de simetria segundo XZ pode-se realizar a seguinte simplificação à matriz de massa do sistema:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} & 0 & m_{15} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ m_{51} & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{bmatrix} \quad [9]$$

resultando em,

$$\mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} m + X_u & 0 & X_w & 0 & m\dot{z}_g + X_q & 0 \\ 0 & m + Y_v & 0 & -m\dot{z}_g + Y_p & 0 & m\dot{x}_g + Y_r \\ Z_u & 0 & m + Z_w & 0 & -m\dot{x}_g + Z_q & 0 \\ 0 & -m\dot{z}_g + K_v & 0 & I_{xx} + K_p & 0 & -I_{xz} + K_r \\ m\dot{z}_g + M_u & 0 & -m\dot{x}_g + M_w & 0 & I_{yy} + M_q & 0 \\ 0 & m\dot{x}_g + N_v & 0 & -I_{xz} + N_p & 0 & I_{zz} + N_r \end{bmatrix} \quad [10]$$

- Coefficientes de Coriolis ( $\mathbf{C}_{RB}$  e  $\mathbf{C}_A$ ):

As matrizes  $\mathbf{C}_{RB}$  e  $\mathbf{C}_A$  tratam-se dos coeficientes de amortecimento resultantes das componentes inerciais do sistema.

Variáveis:

$\mathbf{C}_{RB}$  – Coeficientes de Coriolis resultantes da massa inercial do sistema;

$\mathbf{C}_A$  – Coeficientes de Coriolis resultantes da massa adicionada ao sistema;

$\mathbf{v}_r$  – Velocidade relativa entre o AUV e o fluido ambiente ( $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$ );

$\mathbf{v}_c$  – Velocidade do fluido ambiente (correntes marinhas);

Sendo:

$$\mathbf{v}_r = (u_r, v_r, w_r, 0, 0, 0) \quad [11]$$

$$\mathbf{v}_c = (u_c, v_c, w_c, 0, 0, 0) \quad [12]$$

$$\mathbf{C}_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & 0 & -m(y_g p + w) & m(z_g r + x_g p) & -m(y_g r - u) \\ 0 & 0 & 0 & -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p + y_g q) \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) & 0 & -I_{yz} q - I_{xz} p + I_{zz} r & I_{yz} r + I_{xy} p - I_{yy} q \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g q + u) & I_{yz} q + I_{xz} p - I_{zz} r & 0 & -I_{xz} r - I_{xy} q + I_{xx} p \\ m(x_g r + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) & -I_{yz} r - I_{xy} p + I_{yy} q & I_{xz} r + I_{xy} q - I_{xx} p & 0 \end{bmatrix} \quad [13]$$



$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z \cdot w_r & Y \cdot v_r \\ 0 & 0 & 0 & Z \cdot w_r & 0 & -X \cdot u_r \\ 0 & 0 & 0 & -Y \cdot v_r & X \cdot u_r & 0 \\ 0 & -Z \cdot w_r & Y \cdot v_r & 0 & -N \cdot r & M \cdot q \\ Z \cdot w_r & 0 & -X \cdot u_r & N \cdot r & 0 & -K \cdot p \\ -Y \cdot v_r & X \cdot u_r & 0 & -M \cdot q & K \cdot p & 0 \end{bmatrix} \quad [14]$$

Tal como no caso da matriz de Massa (devido ao meio ambiente aquático) ( $\mathbf{M}_A$ ), os componentes da matriz de Coeficientes de Coriolis resultantes da massa adicionada ao sistema ( $\mathbf{C}_A$ ) são definidos segundo a geometria e distribuição da massa do AUV, sendo realizado a mesma consideração anterior.

- Forças de Arrasto ( $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r)$ ):

As matrizes  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r)$  tratam-se das componentes de amortecimento resultantes das forças de arrasto sentidas pelo corpo.

Variáveis:

$\mathbf{D}$  – Forças de arrasto linear;

$\mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r)$  – Forças de arrasto não linear;

Sendo:

$$\mathbf{D} = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & X_w & 0 & X_q & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & Y_p & 0 & Y_r \\ Z_u & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & K_v & 0 & K_p & 0 & K_r \\ M_u & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & N_p & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad [15]$$

**Consideração nº2** – Em geometrias hidrodinâmicas tradicionais as componentes de arrasto linear cruzado apresentam normalmente valores reduzidos para valores de velocidade baixas, podendo ser desprezadas nestes casos (como o nosso).

$$\mathbf{D}_n(\mathbf{v}_r) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u} |u_r| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{|v|v} |v_r| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{|w|w} |w_r| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{|p|p} |p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{|q|q} |q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{|r|r} |r| \end{bmatrix} \quad [16]$$

$$X_{|u|u} = \frac{1}{2} \rho A_x C_x \quad [17]$$

**Consideração nº3** – No caso das forças de arrasto não linear as componentes de forma ( $X_{|u|u}, Y_{|v|v}$ , etc.) podem ser definidas segundo valores constantes (através de valores aproximados) permitindo a linearização das componentes. Esta aproximação podendo ser um certo grosseira não interfere com o estudo pretendido (devido aos objetivos indicados antes).

No caso de testes em que se necessite maior precisão estas variáveis podem ser calculadas experimentalmente, sendo inseridas posteriormente no modelo com a velocidade da simulação.

- **Forças Hidrostáticas ( $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ ):**

O vetor  $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  representa as forças hidrostáticas (equilíbrio entre peso e impulsão do veículo) aplicadas ao corpo.

Variáveis:

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$  – Forças hidrostáticas resultantes do equilíbrio entre o peso do corpo e a impulsão aplicada;

$W$  – Peso do corpo;

$B$  – Impulsão aplicada ao corpo devido ao seu volume imerso;

$\rho$  – Densidade da água circundante do veículo

$g$  – Aceleração gravítica

Sendo:

$$W = mg ; B = \rho g V \quad [18][19]$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} -(W - B) \sin \theta \\ (W - B) \cos \theta \sin \phi \\ (W - B) \cos \theta \cos \phi \\ (y_g W - y_b B) \cos \theta \cos \phi - (z_g W - z_b B) \cos \theta \sin \phi \\ -(z_g W - z_b B) \sin \theta - (x_g W - x_b B) \cos \theta \cos \phi \\ (x_g W - x_b B) \cos \theta \sin \phi + (y_g W - y_b B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad [20]$$

- **Forças de Controlo ( $\boldsymbol{\tau}$ )**

O vetor  $\boldsymbol{\tau}$  representa o conjunto de forças de controlo aplicadas pelos sistemas de movimentação do veículo.

Variáveis:

$\boldsymbol{\tau}$  – Forças de controlo aplicadas (sistema de movimentação – Hélices e/ou Reservatórios de água controlados por um sistema de controlo)

$\tau_{ci}$  - Força de controlo aplicada pelo atuador  $i$  ( $i=1$  e  $2$  – Correspondentes às Hélices e Reservatórios de água)

Sendo:

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} -\tau_{ci} \sin \theta \\ \tau_{ci} \cos \theta \sin \phi \\ \tau_{ci} \cos \theta \cos \phi \\ y_b \tau_{ci} \cos \theta \cos \phi - z_b \tau_{ci} \cos \theta \sin \phi \\ -z_b \tau_{ci} \sin \theta - x_b \tau_{ci} \cos \theta \cos \phi \\ x_b \tau_{ci} \cos \theta \sin \phi + y_b \tau_{ci} \sin \theta \end{bmatrix} \quad [21]$$

**Passo 5** – Desenvolvimento da Equação do movimento segundo os objetivos e considerações indicadas previamente.

Aplicando as variáveis [Eq.4,5,6,7,8,9,10,13,14,15,16,20 e 21] (definidas no **Passo 2**) e as seguintes considerações à equação movimento [Eq.2] (definida no **Passo 1**) obtemos a Equação de movimento desejada **[Eq.29]**.

**Consideração nº4** – Segundo a simplificação ao estudo do movimento de aproximação de um AUV a uma plataforma de docagem restringindo-o a um movimento vertical (indicado no capítulo 3.2) é realizado o seguinte desenvolvimento:

$$\boldsymbol{\eta} = (0,0,z,0,0,0) \quad [22]$$

$$\boldsymbol{v} = \dot{\boldsymbol{\eta}} = (0,0,w,0,0,0) \quad [23]$$

$$\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\theta}}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{I}_{6 \times 6} \quad [24]$$

**Consideração nº5** – Considerando que o centro de massa do AUV ( $\boldsymbol{\eta}_g$ ) e o centro de impulsão ( $\boldsymbol{\eta}_b$ ) coincidem com a origem do referencial BODY:

$$\boldsymbol{\eta}_g = (0,0,0,0,0,0) \quad [25]$$

$$\boldsymbol{\eta}_b = (0,0,0,0,0,0) \quad [26]$$

**Consideração nº6** – Considerando que o AUV circula em água paradas (não existindo correntes marinhas ou forças de perturbação):

$$\boldsymbol{v}_r = (0,0,w,0,0,0) \quad [27]$$

Segundo estas condições obtemos através da equação de movimento as seguintes equações:

$$\dot{z} = w \quad [28]$$

$$(m + Z_{\dot{w}})\dot{w} - (-Z_w - Z_{|w|w}|w|)w - (W - B) = \tau_c \quad [29]$$

Linearizando o sistema através de:

$$\tau_c = \tau_{c0} + \delta\tau_c; \quad \text{onde } \tau_{c0} = (W - B) \quad [ 30 ]$$

Sendo:

- $\tau_c$  – Força de controlo resultante aplicada;
- $\tau_{c0}$  – Força de controlo resultante associada à eliminação das forças hidrostáticas para criação de flutuabilidade nula;
- $\delta\tau_c$  – Força de controlo resultante adicional para criar o movimento desejado;
- $W$  – Peso do corpo;
- $B$  – Impulsão aplicada ao corpo devido ao seu volume imerso;

(Onde é removido o efeito do peso e a impulsão do veículo considerando que este é anulado e controlado segundo as forças de controlo.)

Obtemos a **Equação de Movimento desejada**:

$$(m + Z_{\dot{w}})\dot{w} - (-Z_w - Z_{|w|w}|w|)w = \delta\tau_c \quad [ 31 ]$$

$$\dot{z} = w \quad [ 32 ]$$

Sendo:

- $m$  – Massa do AUV (Kg);
- $Z_{\dot{w}}$  – Massa adicionada devido ao efeito de Coriolis segundo o eixo vertical (Kg);
- $Z_w$  – Força de arrasto linear segundo o eixo vertical (N/(m/s))
- $Z_{|w|w}$  – Força de arrasto não linear segundo o eixo vertical (N/(m/s)^2)
- $\delta\tau_c$  – Força de controlo resultante linearizada aplicada segundo o eixo vertical(N)
- $\dot{w}$  – Aceleração do AUV (m/s^2)
- $w$  – Velocidade do AUV (m/s)
- $z$  – Posição do AUV (m)

### 3.3 Metodologia de controlo

Nesta secção são abordadas as equações de funcionamento dos sistemas de movimentação e os sistemas de controlo aplicados a estes.

Como referido anteriormente são considerados os seguintes sistemas:

- Sistema dinâmico de movimentação – **Hélices**: devido ao seu grande uso em AUVs, simplicidade de funcionamento e equação de funcionamento trivial.
- Sistema estático de movimentação – **Reservatórios de água**: devido ao seu grande uso em AUVs;
- Sistema de controlo – **Malha fechada simples**: devido a ser o sistema mais simples de estudo, servindo de ponto de referência para outros sistemas de controlo;
- Sistema de controlo - **Controlador PD com *feedback* de aceleração (Km)**: devido à acessibilidade de definição deste controlador, uso comum e permitir controlar segundo as três variáveis de saída (posição, velocidade e aceleração);

Para cada um destes sistemas são apresentadas as formulações matemáticas e a sua representação em Matlab Simulink para implementação no modelo completo.

#### • Análise vibracional do sistema

Antes da formulação das equações dos sistemas de movimentação e controlo realizamos um paralelismo entre a equação de movimento obtida e a equação dinâmica de um sistema de vibração mecânica tradicional de forma a facilitar a utilização e análise das variáveis do sistema:

**Sendo:**

- Equação de movimento obtida:

$$(m + Z_{\dot{w}})\dot{w} - (-Z_w - Z_{|w|w}|w|)w = \delta\tau_c \quad [33]$$

$$\dot{z} = w \quad [34]$$

- Equação dinâmica de um sistema de vibração mecânica tradicional

$$M\dot{w} + dw + Kz = \delta\tau_c \quad [35]$$

**Segundo isto:**

$$\text{Massa relativa do sistema (M):} \quad M = m + Z_{\dot{w}} \quad [36]$$

$$\text{Constante de amortecimento (d):} \quad d = Z_w + Z_{|w|w}|w| \quad [37]$$

$$\text{Constante de rigidez (K):} \quad K = 0 \quad [38]$$

$$\text{Força de controlo } (\delta\tau_c): \quad \delta\tau_c \quad [39]$$

Esta comparação permite melhor entender o funcionamento do sistema e facilita a aplicação de métodos tradicionais de Sistemas de Controlo, nomeadamente o cálculo de diferentes variáveis e constantes.

Trabalhando a equação indicada podemos definir a seguinte equação, que facilita o desenvolvimento dos diferentes métodos de controlo e a definição do sistema em Matlab SimuLink:

$$\dot{w}_n = -\frac{d}{M} w_{n-1} + \frac{1}{M} \delta \tau_c \quad [40]$$

$$\dot{z} = w \quad [41]$$

Sendo:

$M$  – Massa relativa do sistema (Kg);

$d$  – Constante de amortecimento do sistema (N/(m/s));

$\delta \tau_c$  – Forças de controlo linearizadas aplicadas segundo o eixo vertical (N)

$\dot{w}$  – Aceleração do AUV (m/s<sup>2</sup>)

$w_{n-1}$  – Velocidade do AUV registada no momento anterior (m/s)

$z$  – Posição atual do AUV (m)

## • Hélices

A equação de funcionamento das Hélices apresenta uma certa simplicidade, tendo, no entanto, algumas condições para o seu desenvolvimento.

A força gerada ( $F_{hélices}$ ) pelas Hélices é descrita segundo a seguinte equação:

$$F_{hélices}(t) = K_h \cdot u(t) \quad (N) \quad [42]$$

Sendo:

$F_{hélices}(t)$  – Força exercida pelas hélices (N);

$K_h$  – Constante de força/velocidade da hélice (N/(m/s));

$u(t)$  – Velocidade de rotação da hélice (m/s);

$t$  – tempo (s);

**Consideração nº6** – A constante de força/velocidade da hélice ( $K_h$ ) é dependente de dois fatores mencionados no capítulo anterior: forma e tamanho das pás da Hélice.

Este fator é calculado através de fórmulas de funcionamento dependentes das pás, trazendo outro nível de complexidade ao modelo que não é desejado. Tendo isto em conta consideramos que este fator é conhecido para as Hélices em teste de forma a aliviar este nível extra de complexidade ao modelo.

**Consideração nº7** – A velocidade de rotação da hélice ( $u$ ) é dada segundo o motor elétrico associado a estas. Estes motores apresentam curvas de funcionamento específicas que só em casos muito particulares se apresentam totalmente lineares em toda a gama de funcionamento. No entanto o processo de docagem é realizado a baixas velocidades, que normalmente se situam na parte linear destas curvas.

Sendo assim, de forma evitar a necessidade de introdução das curvas de funcionamento no programa de simulação considerou-se que o funcionamento é próximo do linear para toda a gama.

### Definição das Hélices no Matlab Simulink:

A definição das Hélices no Matlab Simulink para além da fórmula acima descrita definiu-se um SWITCH. Este SWITCH é um sistema interno do AUV que permite definir quando é necessário atuar as Hélices durante a aproximação à plataforma de docagem.

Este sistema foi considerado de forma a ter em conta a energia despendida pelas Hélices, estando no nosso interesse reduzir o seu uso ao mínimo durante a aproximação. No caso de um sistema só com Hélices a aproximação é realizada pelo peso do corpo em queda livre. Caso este possua sistemas de variação de lastro a aproximação é realizada por estes, sendo estes desativados quando há a ativação das hélices).

### **Modelo do SWITCH**

O ponto em que o SWITCH é ativado dependerá da força máxima disponível pelas Hélices, da massa do AUV, a velocidade e a posição atual que o corpo se encontra em relação à profundidade de docagem.

Considerando as seguintes fórmulas:

$$z' = z_0 + w_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad [43]$$

$$w = w_0 + a t \quad [44]$$

$$a = - \frac{w_0}{|w_0|} \frac{F_{\text{hélices máx}}}{M} \quad [45]$$

Sendo:

$z$  – Posição de paragem (m);

$z_0$  – Posição atual (m);

$w$  – Velocidade de paragem (m/s);

$w_0$  – Velocidade atual (m/s);

$a$  – Aceleração do AUV a atuação máxima das Hélices no sentido inverso da velocidade (m/s<sup>2</sup>);

$t$  – Tempo de paragem (s);

A fórmula [43] acima permite calcular o tempo de paragem do AUV, segundo a posição e velocidade atuais se houver a atuação das Hélices a força máxima no sentido inverso, considerando ( $w = 0$ ):

$$0 = w_0 + a t \Leftrightarrow t' = \left| \frac{w_0}{a} \right| \quad [46]$$

Utilizando este tempo de paragem na fórmula [46] podemos determinar a profundidade de paragem ( $z$ ):

$$z' = z_0 + w_0 t' + \frac{1}{2} a t'^2 \quad [47]$$

Utilizando esta posição calculada podemos saber se o AUV necessita de atuar as Hélices caso esta seja superior à profundidade de docagem. Para ter uma margem de segurança na paragem é utilizado um fator de segurança no cálculo desta profundidade:

$$z' - z'_d = SWITCH, \quad \text{caso } SWITCH \geq 0 \text{ as Hélices são atuadas} \quad [48]$$

$$z'_d = z_d - |Sz_d| \quad OU \quad z'_d = z_d - 2 \quad [49]$$

Sendo:

$z'$  – Profundidade de paragem calculada (m);

$z_d'$  – Profundidade de paragem desejada com o fator de segurança (m);

$S$  – Fator de segurança,  $0 \leq S \leq 1$ . Caso  $|Sz_d| < 2$  este é reformulado para 2;

(Caso a distância de segurança de paragem  $|Sz_d|$  seja inferior a 2 metros esta é definida como 2 metros. Esta distância foi selecionada para as simulações apresentadas de modo a ilustrar o sistema do SWITCH, mas podendo ser ajustada para outro valor pretendido).

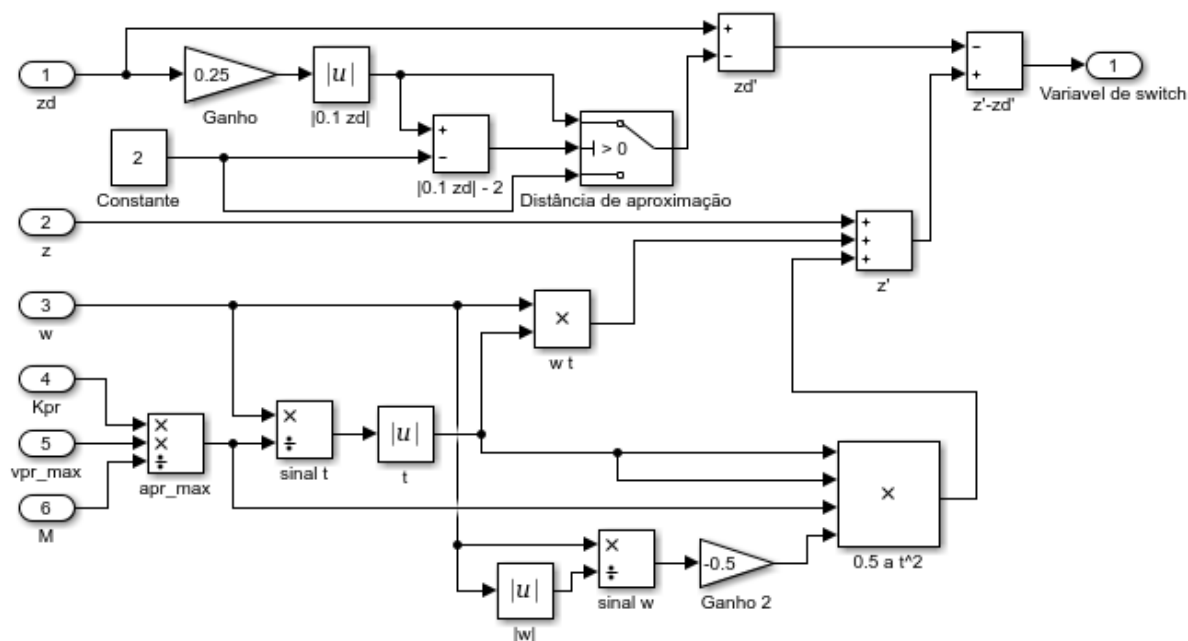


Figura 3.2 - Diagrama em Matlab Simulink do SWITCH.



### Modelo das Hélices

É de notar que no modelo definido foi necessário definir o limite de atuação dos motores das Hélices, o SWITCH e o efeito das forças hidroestáticas e o peso (que foi removido durante a linearização na secção 2.3 – Equações de movimento).

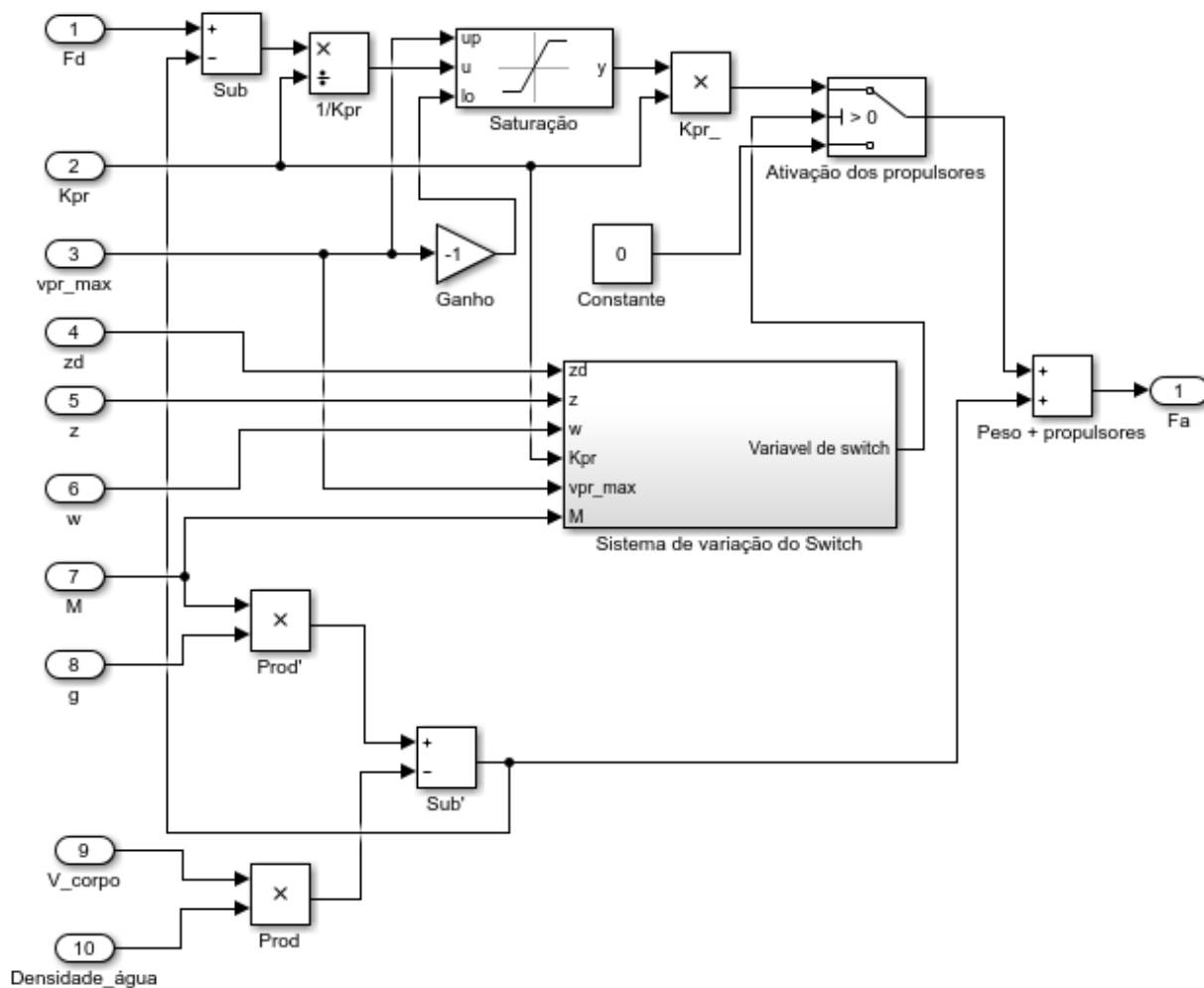


Figura 3.3 - Diagrama em Matlab Simulink do modelo das Hélices.

- **Reservatórios de água**

A equação de funcionamento dos reservatórios de água é definida segundo o volume de água presente nos reservatórios, sendo este volume definido segundo o enchimento do reservatório realizado pela bomba hidráulica. Cada um destes sistemas é limitado pelas capacidades dos equipamentos envolvidos: Limite volumétrico dos reservatórios e o Caudal máximo debitado pela bomba, respetivamente.

Considerando as seguintes fórmulas:

$$F_{SVL}(t) = V_r'(t)g\rho_{\acute{a}gua} (N) \quad [ 50 ]$$

$$V_r'(t) = V_r(t) - \left( \frac{M_{AUV}}{\rho_{\acute{a}gua}} - V_{AUV} \right) (m^3) \quad [ 51 ]$$

$$V_r(t) = V_0(t) + Q(t).t, \quad 0 \leq V_r \leq V_{r\acute{m}ax} \quad [ 52 ]$$

$$Q(t) = q \cdot \%q(t).t \quad \left( \frac{m^3}{s} \right), \quad 0 \leq \%q \leq 1 \quad [ 53 ]$$

Sendo:

- $F_{SVL}(t)$  – Força exercida pelo Sistema de variação de lastro (N);
- $V_r'(t)$  – Volume de água dentro do reservatório relativo ao volume de flutuabilidade nula ( $m^3$ );
- $g$  – Aceleração gravítica ( $m/s^2$ );
- $\rho_{\acute{a}gua}$  – Densidade da água circundante do AUV ( $Kg/m^3$ );
- $V_r(t)$  – Volume de água dentro do reservatório ( $m^3$ );
- $V_{r\acute{m}ax}$  – Volume de água máximo do reservatório ( $m^3$ );
- $M_{AUV}$  – Massa do AUV (Kg);
- $V_{AUV}$  – Volume do AUV ( $m^3$ );
- $V_0(t)$  – Volume atual de água dentro do reservatório ( $m^3$ );
- $Q(t)$  – Caudal fornecido pela bomba ( $m^3/s$ );
- $t$  – tempo (s);
- $q$  – Caudal máximo da bomba ( $m^3/s$ );
- $\%q(t)$  – Percentagem do caudal da bomba em efeito;

### Modelo dos Reservatórios de água

É de notar que no modelo definido o nível de água, para flutuabilidade nula, é definido segundo  $\left(\frac{M_{AUV}}{\rho_{\text{água}}} - V_{AUV}\right)$ , onde a massa e o volume do AUV definem o volume de água necessário no reservatório para o efeito. Para evitar problemas de controlo este volume deve ser um valor relativamente perto de 50% do volume do reservatório, podendo ser controlado adicionando/removendo massa ao veículo.

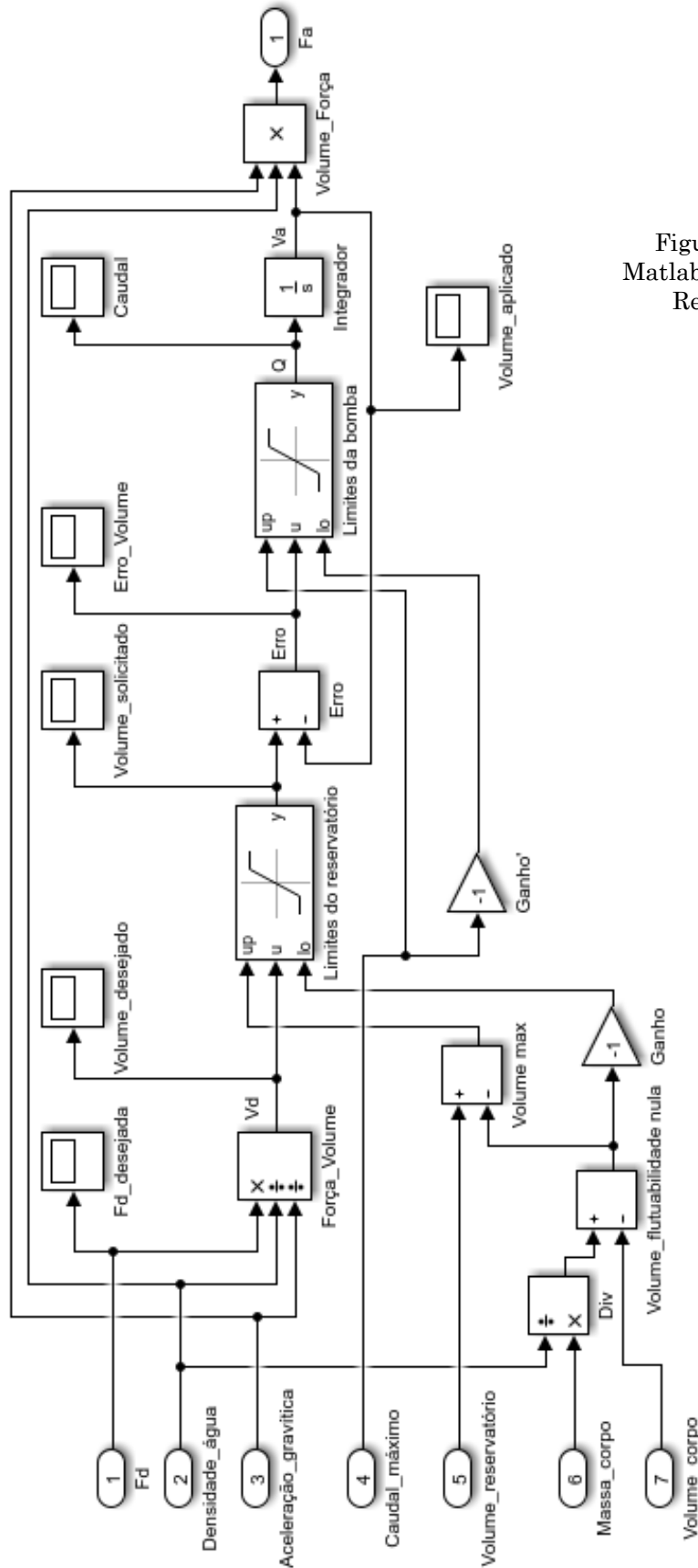


Figura 3.4 - Diagrama em Matlab Simulink do modelo dos Reservatórios de água.

## • Malha fechada simples

O sistema de Malha Fechada é um dos métodos mais simples de controlo possuindo uma construção simples e robusta, mas que depende da estrutura intrínseca do sistema permitindo respostas indesejadas e erros constantes.

Este método consiste na aplicação de um sinal de controlo com a posição desejada ( $z_d$ ) que é comparado com a posição registada do corpo ( $z_{n-1}$ ) resultando num erro ( $z_{erro}$ ), sendo este erro que define a força de controlo. O erro é então minimizado pelo sistema de modo a ser atingida a posição desejada.

A aplicação deste método normalmente não produz resultados desejados, mas permite analisar a resposta do sistema e observar as necessidades de controlo deste.

### Equação do sistema de Malha fechada simples:

$$\dot{w}_n = -\frac{d}{M} w_n + \frac{1}{M} z_{erro} \quad [54]$$

$$\dot{z} = w \quad [55]$$

Sendo:

$M$  – Massa relativa do sistema (Kg);

$d$  – Constante de amortecimento do sistema (N/(m/s));

$\delta\tau_c$  – Forças de controlo linearizadas aplicadas segundo o eixo vertical (N)

$z_{erro}$  – Erro unitário da posição (N), onde  $\delta\tau_c = z_{erro} = z_d - z_n$

$\dot{w}$  – Aceleração do AUV (m/s<sup>2</sup>)

$w_{n-1}$  – Velocidade do AUV registada no momento anterior (m/s)

$z_{n-1}$  – Posição registado do AUV (m)

$z_d$  – Posição desejada do AUV: Profundidade da estação de docagem (m)

### Modelo de sistema de Malha fechada simples

Neste modelo inicial são consideradas as características físicas e dinâmicas dum AUV sem sistemas de movimentação. A força de controlo aplicada é considerada ideal, isto é a força desejada pelo controlador e a força aplicada no sistema são iguais. Este sistema será utilizado como ponto de referência para os outros modelos definidos.

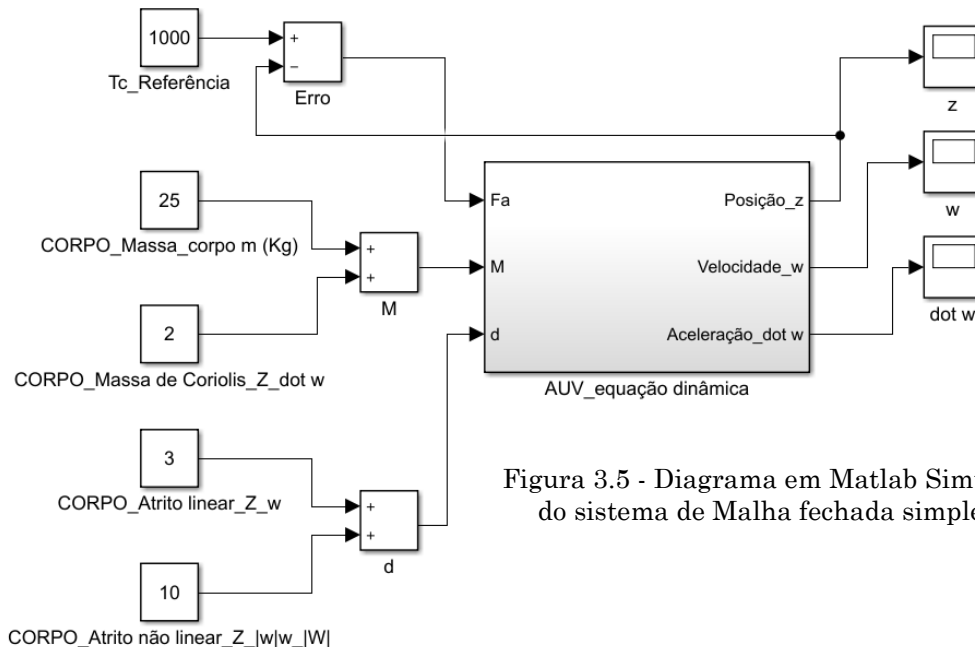


Figura 3.5 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Malha fechada simples.

## • Controlador PD com Feedback da Aceleração (Km)

O sistema de controlador PD com Feedback de aceleração é um dos métodos de controlo mais utilizados na indústria devido à sua adaptabilidade e versatilidade.

A utilização de controladores PD permite o controlo do método de aproximação da resposta ao valor desejado através da implementação de variáveis que influenciam a dinâmica da resposta obtida: amortecimento relativo, rigidez relativa, frequência da resposta, etc. Isto permite controlar diversos parâmetros da resposta como: sobrelongação (*overshoot*), tempo de acomodação (*settling time*), entre outros. No entanto, é importante ter em conta que o controlo de cada uma destas variáveis não é independente, sendo normalmente necessário estabelecer um compromisso entre sobrelongação, tempo de acomodação e estabilidade do sistema.

O funcionamento do controlador PD consiste na aplicação de 2 constantes: constante proporcional ( $K_p$ ) e constante derivativa ( $K_d$ ) em conjunto com 2 variáveis: o erro atual ( $z_{erro}$ ) e a derivada do erro ( $\dot{z}_{erro}$ ) respetivamente. Estas 2 componentes influenciam a resposta proporcionalmente e derivativamente permitindo a sua modulação.

Para além destas componentes é aplicado o *feedback* da aceleração que permite o controlo da aceleração do sistema, que no caso de um sistema de posição como o estudado não é conseguido diretamente através do controlador PD.

Ao contrário do método anterior, este método de controlo é capaz de produzir resultados interessantes com a aplicação real. No entanto é de notar que este método é indicado para sistemas de vibração mecânica tradicionais, sendo as constantes calculadas através das características do sistema. No caso aqui estudado o sistema não possui rigidez natural ( $K$ ) (devido a não haver influência relevante da posição do corpo na dinâmica do movimento) levantando um problema quanto ao cálculo das constantes. De forma a contornar este problema as constantes ( $K_m, K_d$  e  $K_p$ ) foram calculadas segundo as características do sistema ( $M$  e  $d$ ), a frequência natural de atuação do sistema de controlo ( $\omega_{nc}$ ) e outras variáveis de controlo ( $\alpha$  e  $\beta$ ), de forma a obter um comportamento desejado onde há a eliminação da sobrelongação.

### Equação do sistema de controlador PD com *feedback* de aceleração (Km):

$$\dot{w}_n = -\frac{d}{M}w_n + \frac{1}{M}[K_p \cdot z_{erro} + K_d \cdot \dot{z}_{erro} + K_m \cdot \dot{w}_n] \quad [56]$$

$$\omega_n' = \frac{d}{2(M+K_m)}\beta ; \quad \xi' = \frac{d}{2M\omega_n'} \quad [57]$$

Definição das constantes de controlo segundo [Eq.58,59 e 60]:

$$K_m = \alpha M - M, \quad \text{onde } \alpha = \frac{5d}{M\omega_{nc}} \text{ sendo } \alpha \geq 1 \quad [58]$$

$$K_d = 2\xi'\omega_n'(M + K_m) - d \quad [59]$$

$$K_p = \omega_n'^2(M + K_m) \quad [60]$$

Sendo:

$M$  – Massa relativa do sistema (Kg);  
 $d$  – Constante de amortecimento do sistema (N/(m/s));  
 $\delta\tau_c$  – Forças de controlo linearizadas aplicadas segundo o eixo vertical (N);  
 $z_{erro}$  – Erro unitário da posição (N), onde  $\delta\tau_c = z_{erro} = z_d - z_n$ ;  
 $\dot{w}$  – Aceleração do AUV (m/s<sup>2</sup>);  
 $w_n$  – Velocidade do AUV registada no momento anterior (m/s);  
 $z_n$  – Posição registada do AUV (m);  
 $\omega_n'$  – Frequência natural para definição das variáveis de controlo;  
 $\xi'$  – Constante de amortecimento para definição das variáveis de controlo;  
 $\omega_{nc}$  – Frequência natural de atuação do sistema de controlo (esta frequência é a frequência natural do sistema de controlo, sendo necessário garantir que o sistema tenha pelo menos uma frequência natural inferior a um 1/10 desta frequência. Isto é importante para que o sistema de controlo seja capaz de reagir eficazmente ao sistema);  
 $K_m$  – Ganho do Feedback de aceleração (definido segundo massa do sistema, adicionando massa virtual se necessário caso o amortecimento seja muito superior à massa);  
 $K_d$  – Ganho derivativo do erro (definido segundo a constante de amortecimento e frequência natural de controlo, sendo controlado pela constante  $\beta$ );  
 $K_p$  – Ganho proporcional do erro (definido segundo a frequência natural de controlo, dependendo também de  $\beta$ );  
 $\beta$  – Constante de controlo do amortecimento do sistema, onde  $\beta > 0$ ;  
 $\alpha$  – Constante de controlo do Feedback da aceleração (definido segundo as características do sistema dinâmico e controlo);

### Modelo de sistema de controlador PD com *feedback* de aceleração (Km)

Neste modelo, tal como o modelo anterior, são consideradas as características físicas e dinâmicas dum AUV sem sistemas de movimentação. Neste caso a força de controlo aplicada é definida segundo o controlador PD com Feedback de aceleração, segundo a referência aplicada. Este sistema será utilizado como ponto de referência da eficiência do controlador PD com Feedback de aceleração (Km).

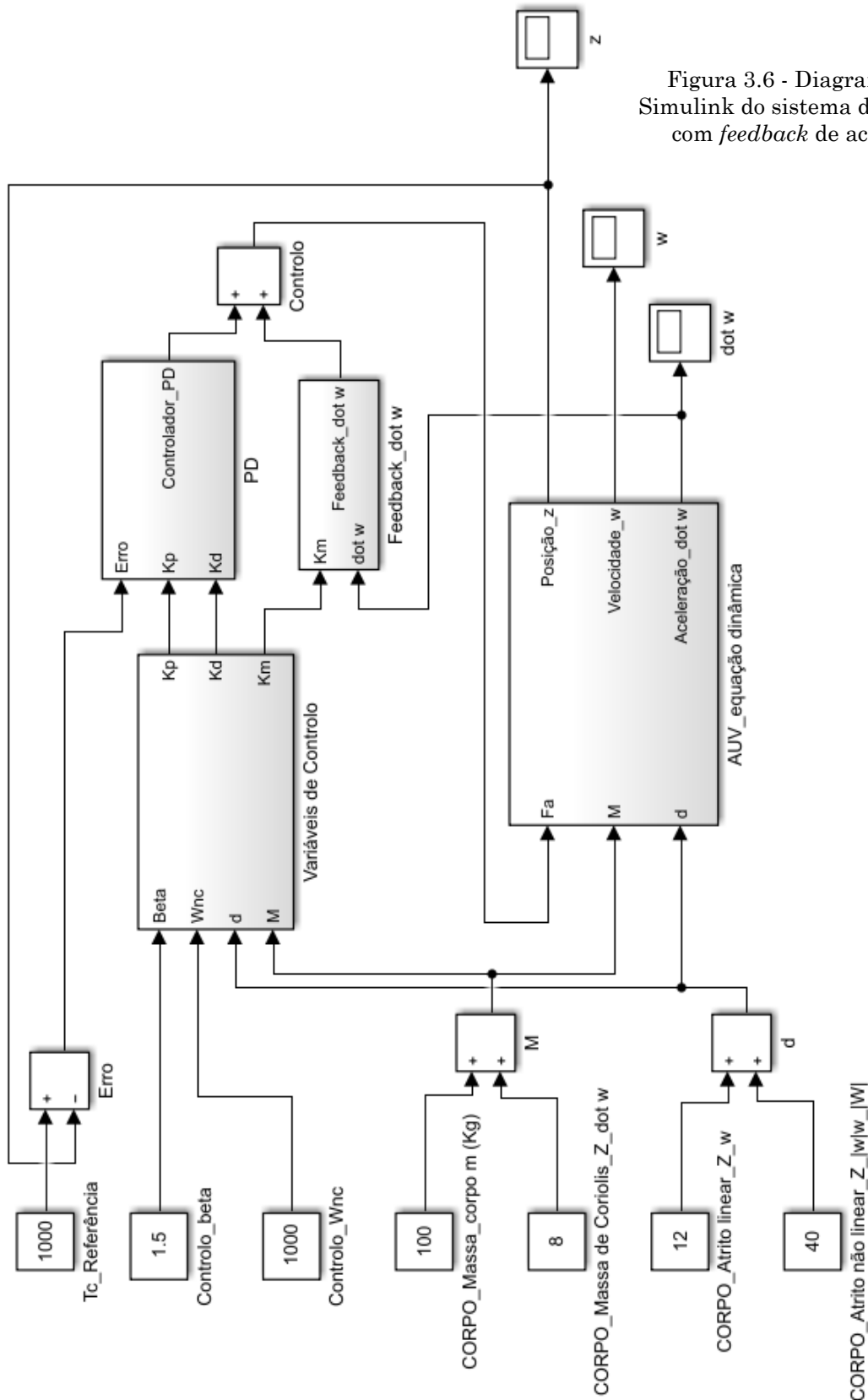


Figura 3.6 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de controlador PD com *feedback* de aceleração (Km)





Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação.

Variáveis de entrada	1	2	3	4	
Volume do AUV ( $V$ )	<u>0,005</u>	<u>0,020</u>	<u>0,100</u>	<u>0,200</u>	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	<u>25</u>	<u>100</u>	<u>500</u>	<u>1000</u>	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>40</u>	<u>80</u>	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	<u>3</u>	<u>12</u>	<u>60</u>	<u>120</u>	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	<u>10</u>	<u>40</u>	<u>200</u>	<u>400</u>	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)

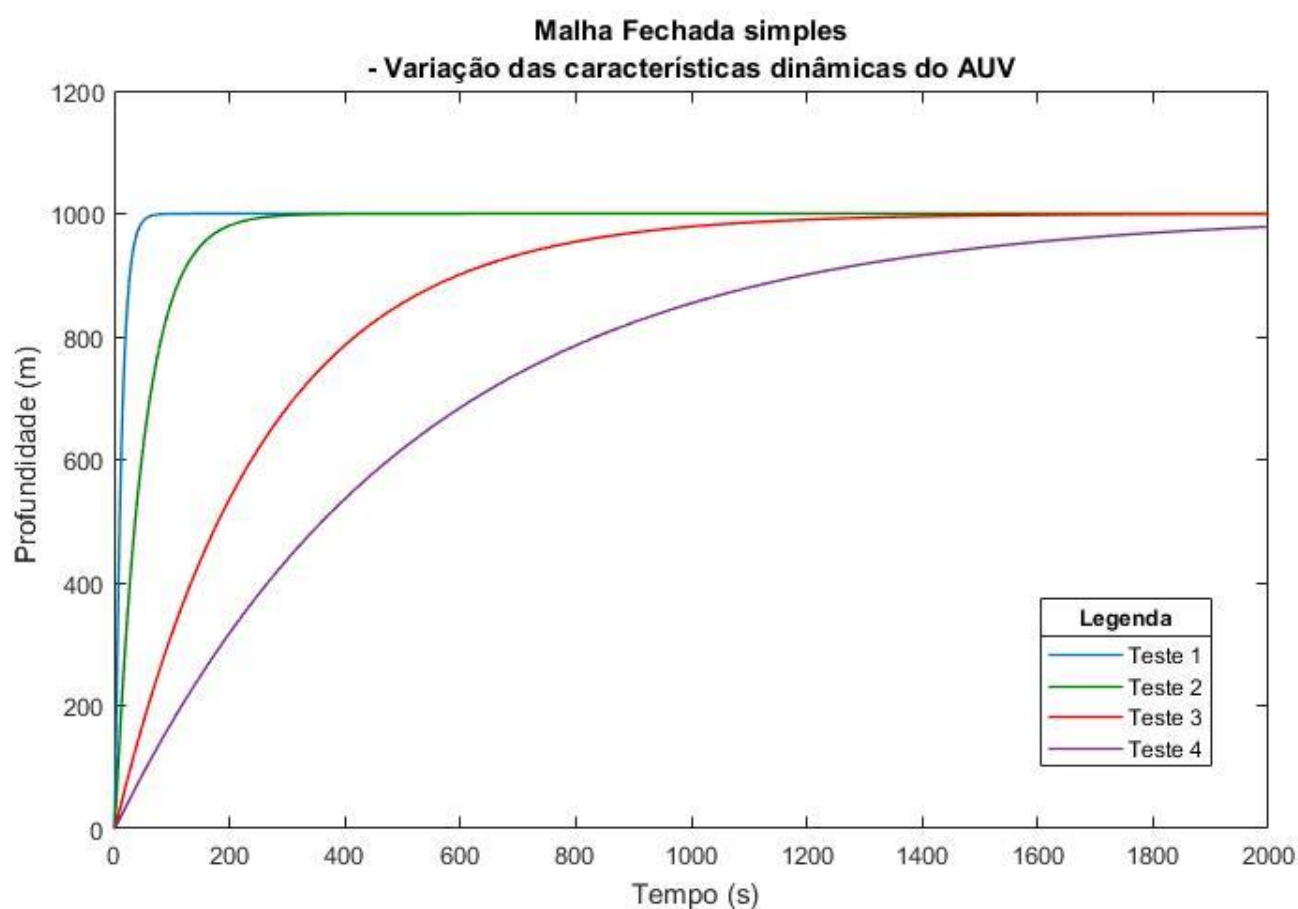
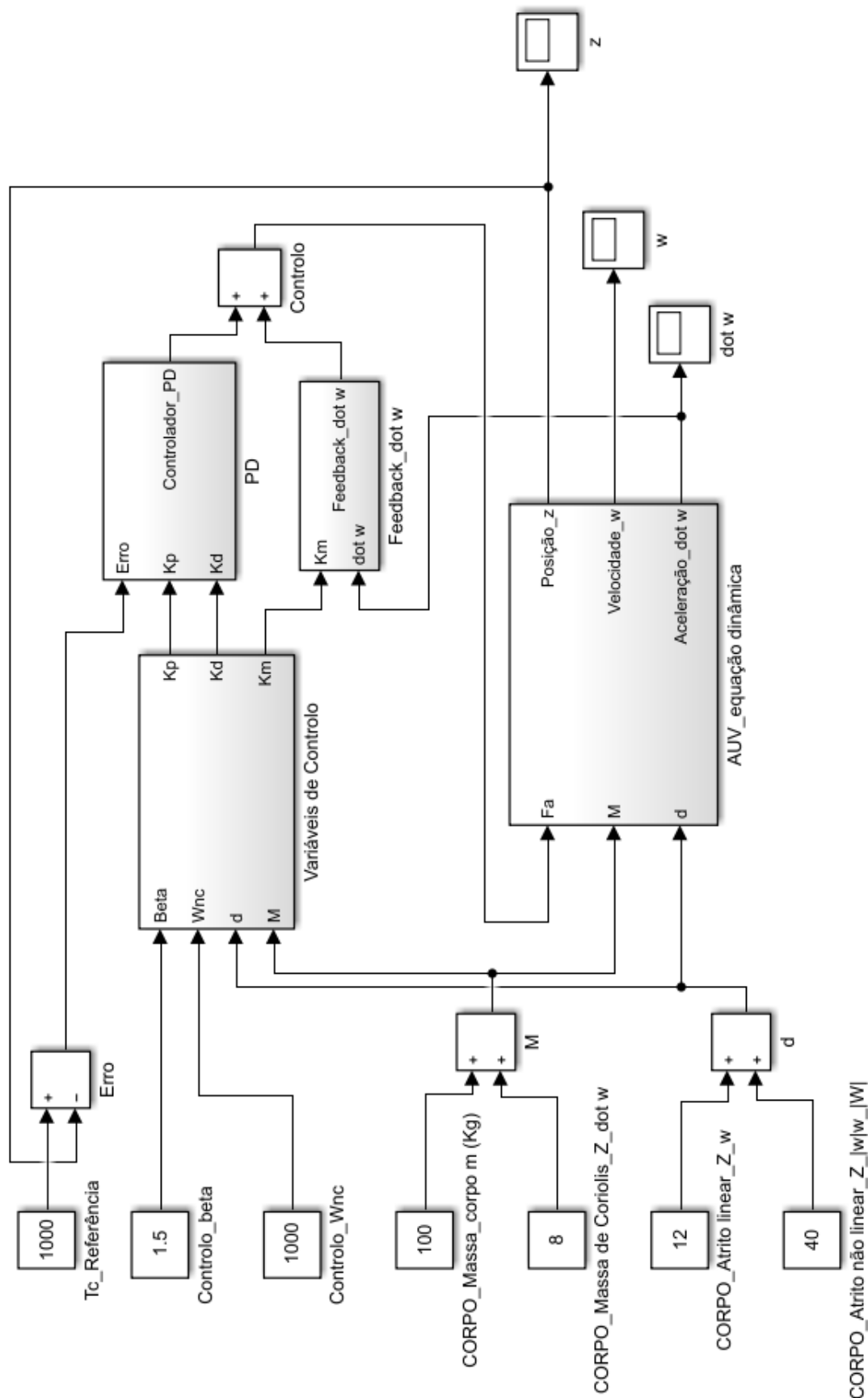


Figura 3.8 - Respostas do sistema de Malha fechada simples– atuação ideal.

- **Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)**  
– atuação ideal

Figura 3.9 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – atuação ideal



Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para as mesmas constantes de controle.

Variáveis de entrada	1	2	3	4	
Volume do AUV ( $V$ )	<u>0,005</u>	<u>0,020</u>	<u>0,100</u>	<u>0,200</u>	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	<u>25</u>	<u>100</u>	<u>500</u>	<u>1000</u>	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>40</u>	<u>80</u>	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	<u>3</u>	<u>12</u>	<u>60</u>	<u>120</u>	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	<u>10</u>	<u>40</u>	<u>200</u>	<u>400</u>	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controle ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	

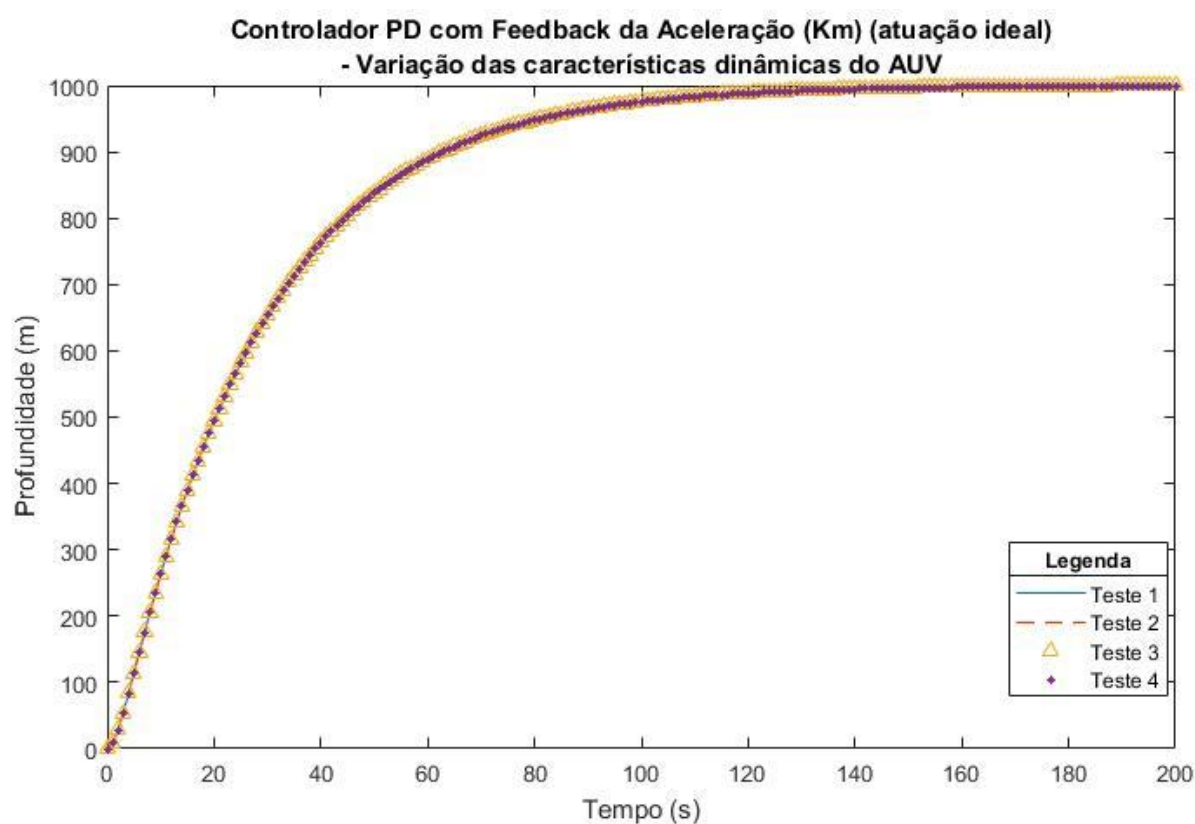


Figura 3.10 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – atuação ideal, para diferentes características dinâmicas.

Teste: Diferentes constantes de controlo para as mesmas características dinâmicas.

Variáveis de entrada	5	6	7	8	
Volume do AUV (V)	0,020	0,020	0,020	0,020	(m <sup>3</sup> )
Massa do AUV (m)	100	100	100	100	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_{\dot{w}}$ )	8	8	8	8	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	12	12	12	12	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	40	40	40	40	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	<u>0,1</u>	<u>0,5</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	

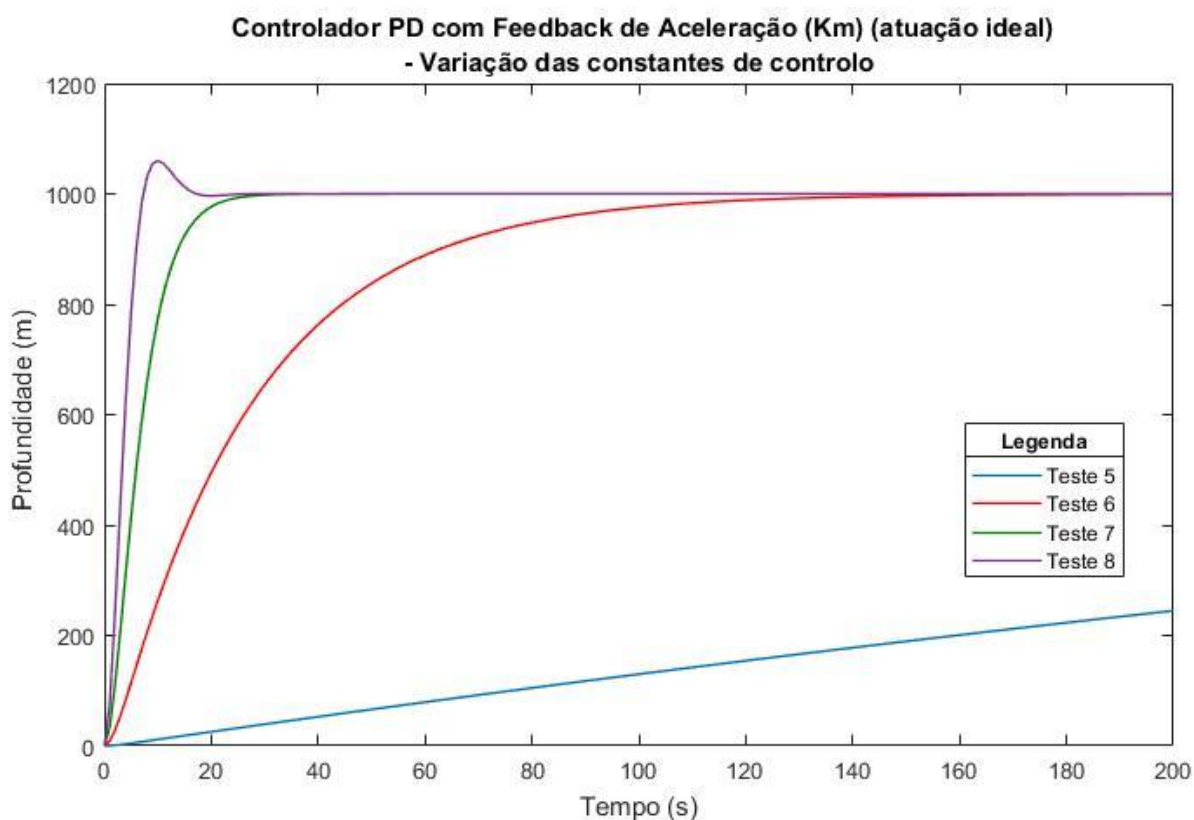
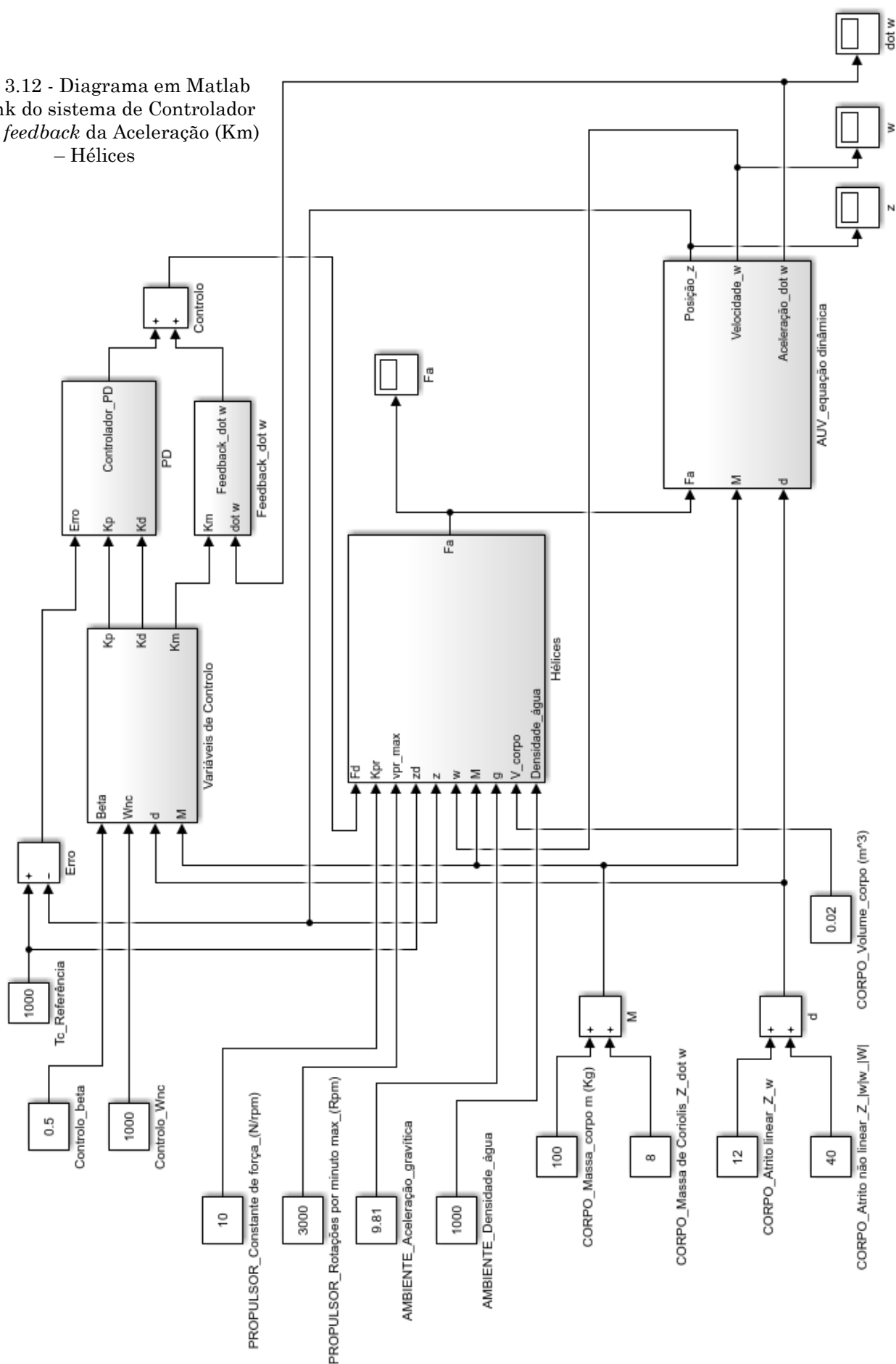


Figura 3.11 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – atuação ideal, para diferentes constantes de controlo.

- **Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices**

Figura 3.12 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices



Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de entrada	1	2	3	4	
Volume do AUV ( $V$ )	<u>0,005</u>	<u>0,020</u>	<u>0,100</u>	<u>0,200</u>	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	<u>25</u>	<u>100</u>	<u>500</u>	<u>1000</u>	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_{\dot{w}}$ )	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>40</u>	<u>80</u>	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	<u>3</u>	<u>12</u>	<u>60</u>	<u>120</u>	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	<u>10</u>	<u>40</u>	<u>200</u>	<u>400</u>	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	1	1	1	1	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	3000	3000	(Rpm)

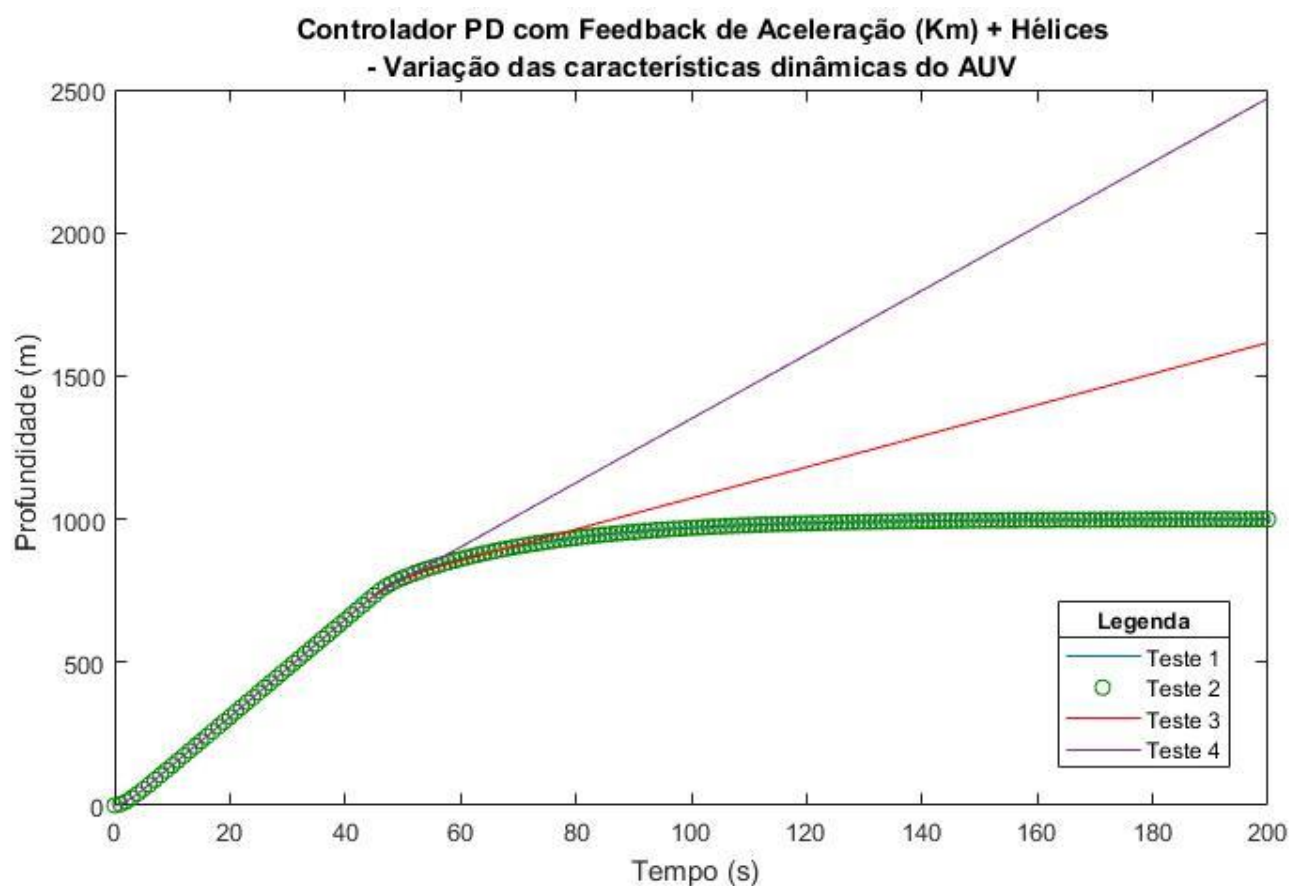


Figura 3.13 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes características dinâmicas.

Teste Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de entrada	5	6	7	8	
Volume do AUV ( $V$ )	0,020	0,020	0,020	0,020	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	100	100	100	100	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_{\dot{w}}$ )	8	8	8	8	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	12	12	12	12	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	40	40	40	40	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	<u>0,1</u>	<u>0,5</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	1	1	1	1	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	3000	3000	(Rpm)

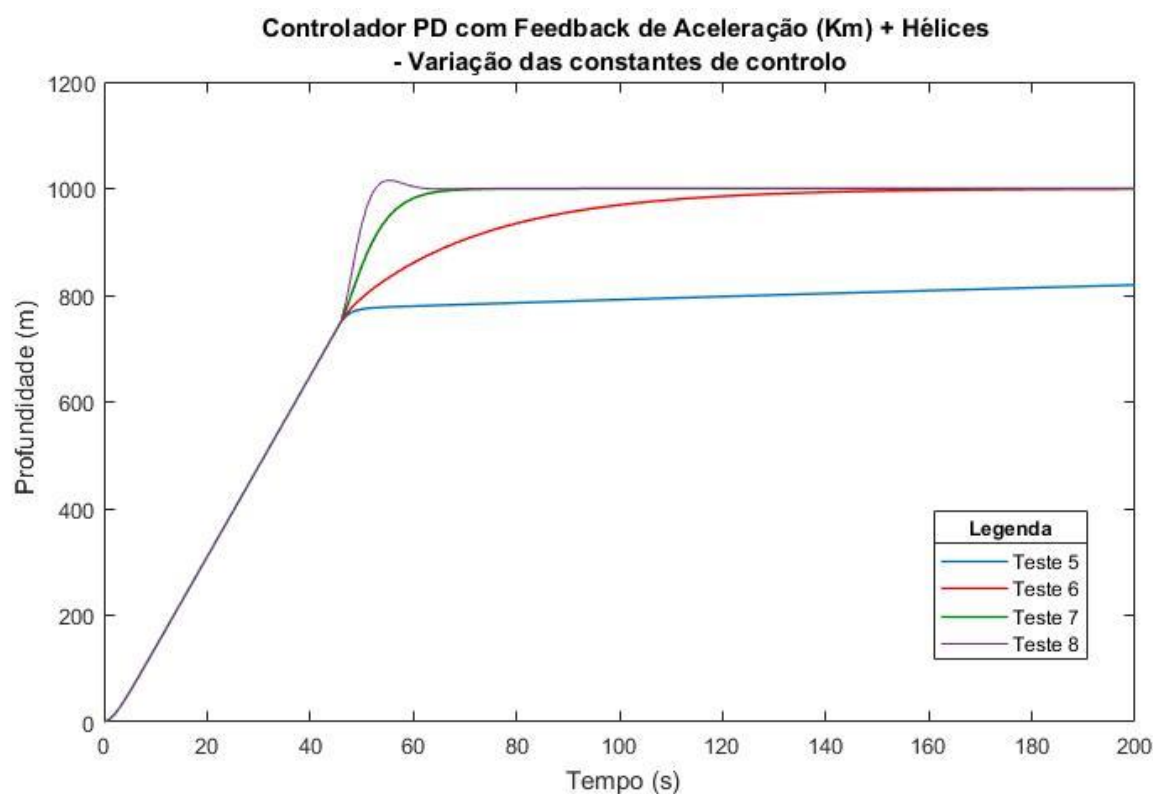


Figura 3.14 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes constantes de controlo.

Teste: Diferentes sistemas de atuação para as mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de entrada	9	10	11	12	
Volume do AUV ( $V$ )	0,020	0,020	0,020	0,020	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	100	100	100	100	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_{\dot{w}}$ )	8	8	8	8	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	12	12	12	12	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	40	40	40	40	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	<u>0,5</u>	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>10</u>	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	3000	3000	(Rpm)

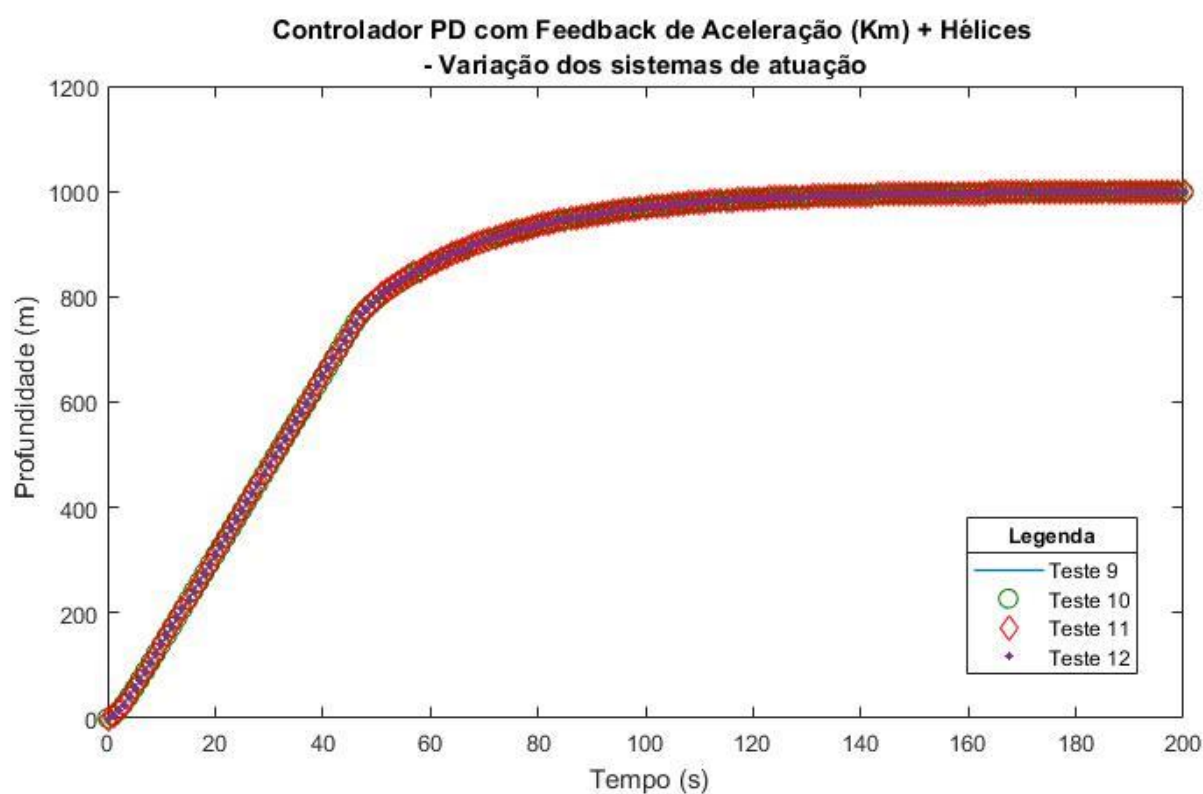
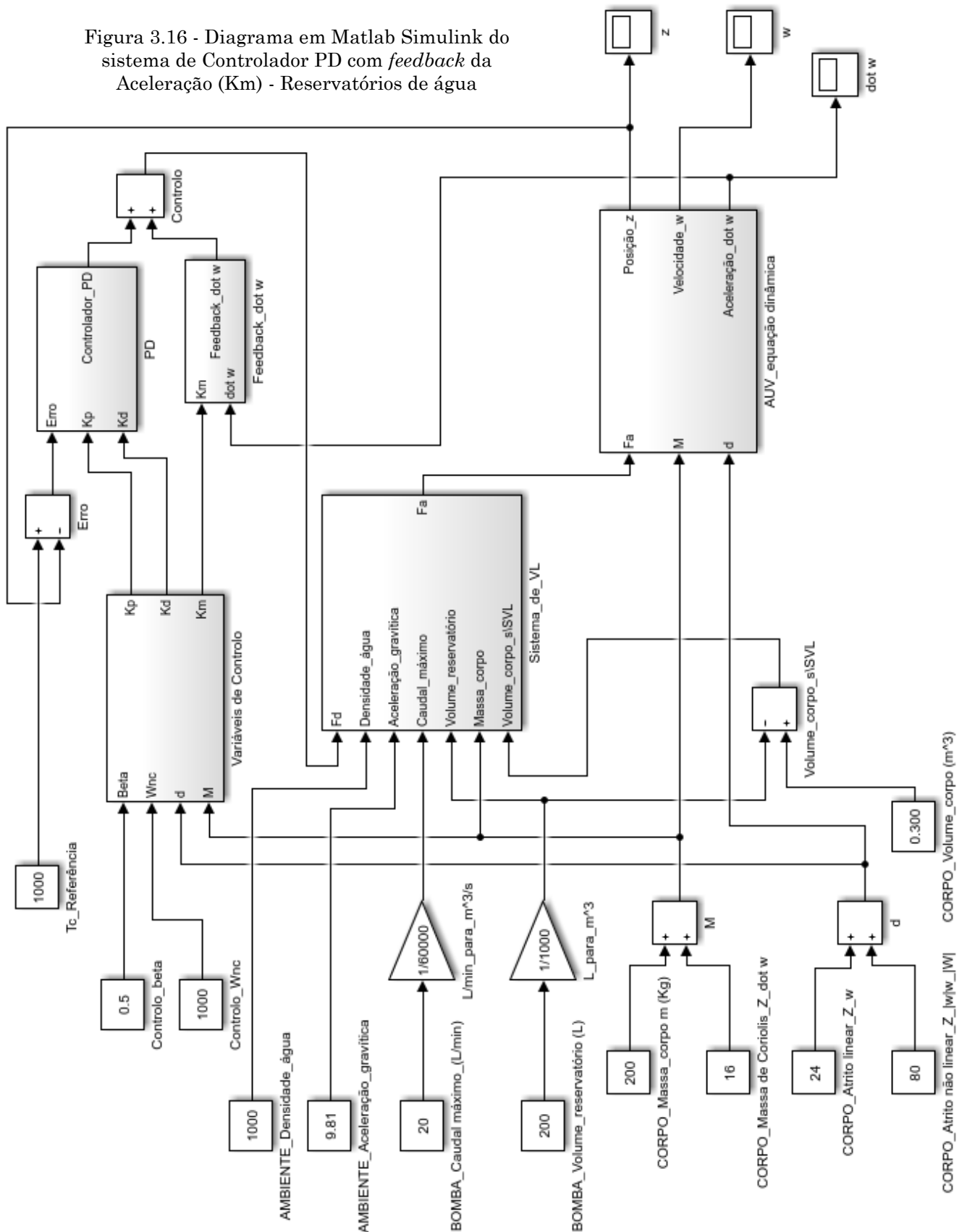


Figura 3.15 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices, para diferentes sistemas de atuação.



- Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)  
– Reservatórios de água**

Figura 3.16 - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) - Reservatórios de água



Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de entrada	1	2	3	4	
Volume do AUV ( $V$ )	<u>0,250</u>	<u>0,300</u>	<u>0,600</u>	<u>0,900</u>	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	<u>100</u>	<u>200</u>	<u>450</u>	<u>700</u>	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	<u>8</u>	<u>16</u>	<u>32</u>	<u>64</u>	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	<u>12</u>	<u>24</u>	<u>48</u>	<u>96</u>	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	<u>40</u>	<u>80</u>	<u>160</u>	<u>320</u>	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{rmax}$ )	200	200	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	20	20	20	20	(l/min)

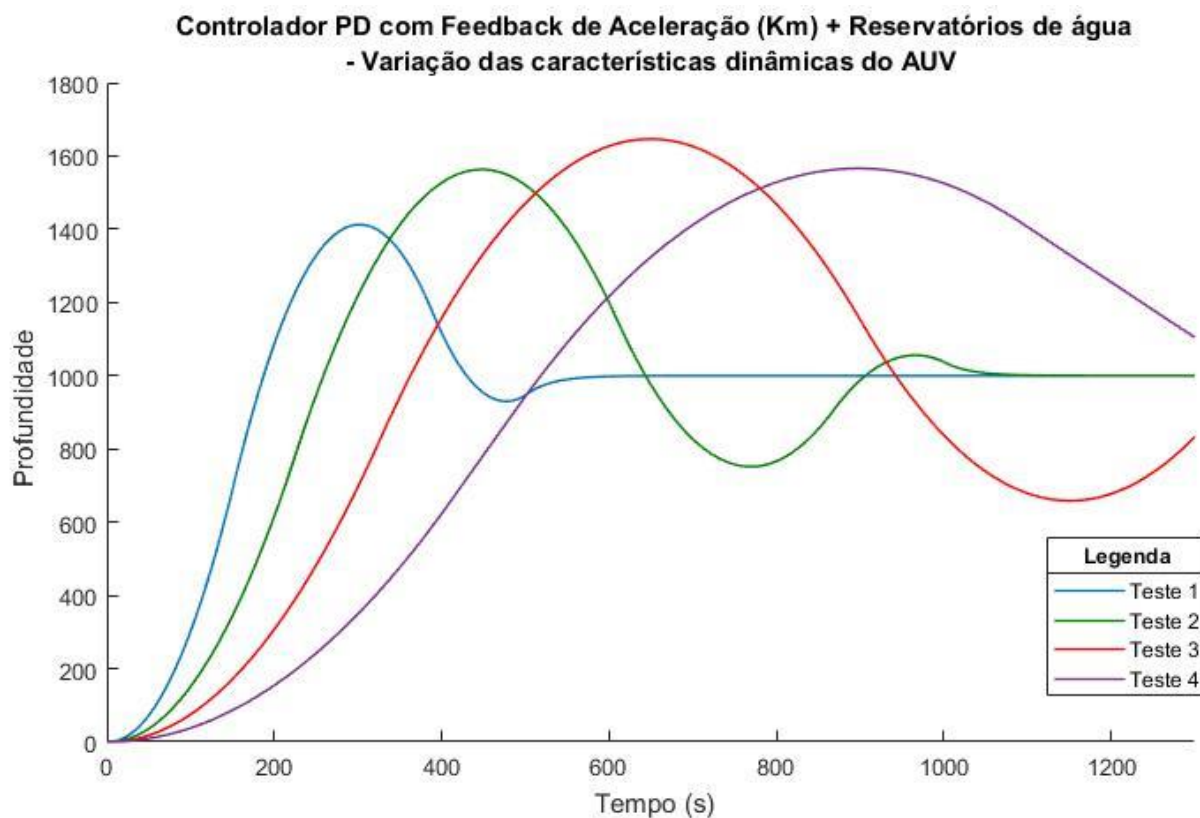


Figura 3.17 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes características dinâmicas.

Teste: Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de entrada	5	6	7	8	
Volume do AUV ( $V$ )	0,300	0,300	0,300	0,300	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	200	200	200	200	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	16	16	16	16	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	24	24	24	24	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	80	80	80	80	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	<u>0,1</u>	<u>0,25</u>	<u>0,5</u>	<u>1</u>	
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{rmax}$ )	200	200	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	20	20	20	20	(l/min)

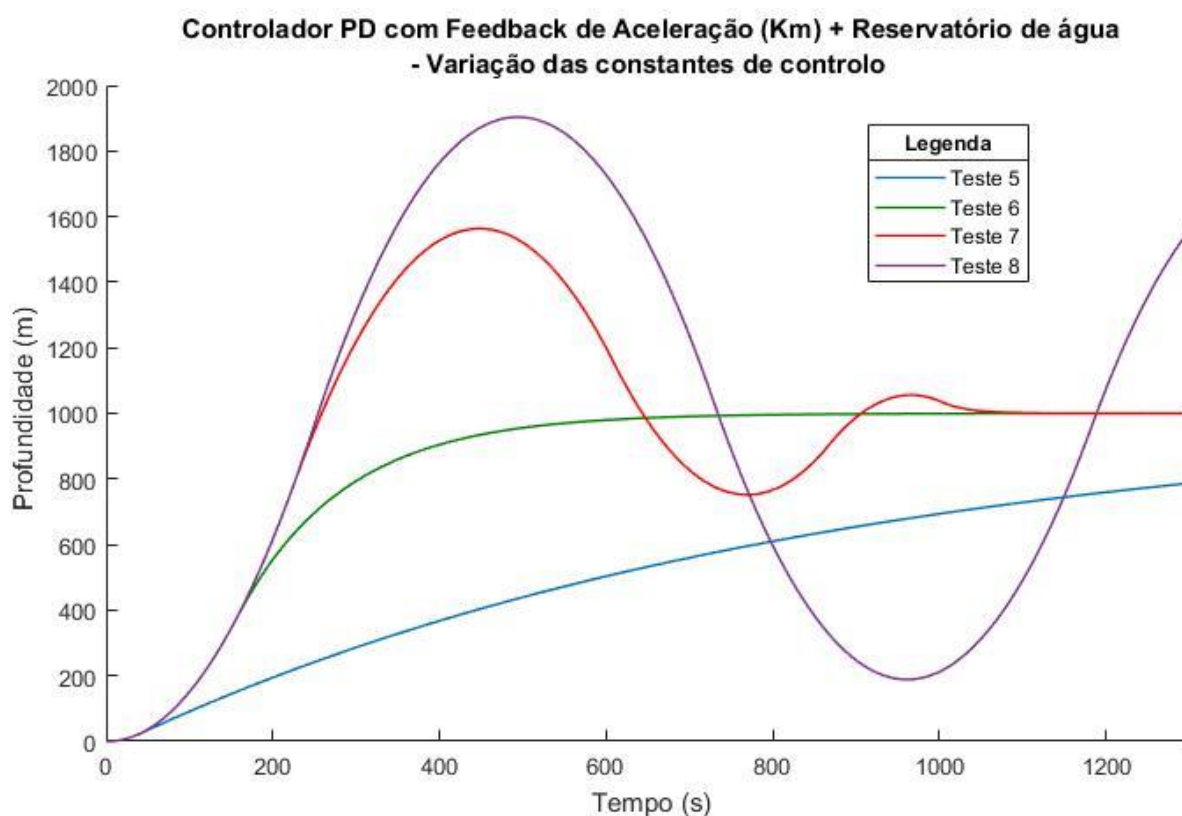


Figura 3.18 - - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes constantes de controlo.

Teste: Diferentes sistemas de atuação para os mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de entrada	9	10	11	12	
Volume do AUV ( $V$ )	0,300	0,300	0,300	0,300	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	200	200	200	200	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	16	16	16	16	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	24	24	24	24	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	80	80	80	80	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{rmax}$ )	200	200	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	<u>5</u>	<u>10</u>	<u>20</u>	<u>40</u>	(l/min)

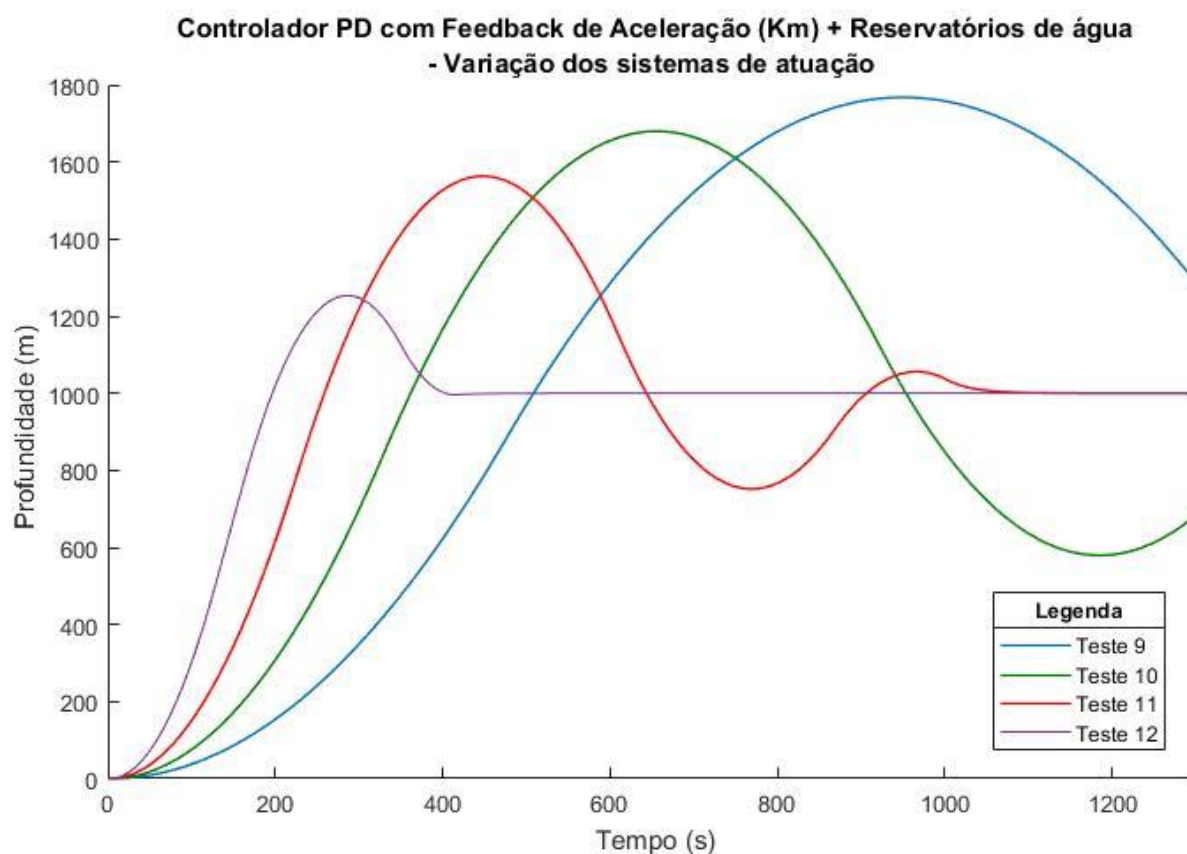


Figura 3.19 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Reservatórios de água, para diferentes sistemas de atuação.

- Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)**  
– Hélices + Reservatórios de água

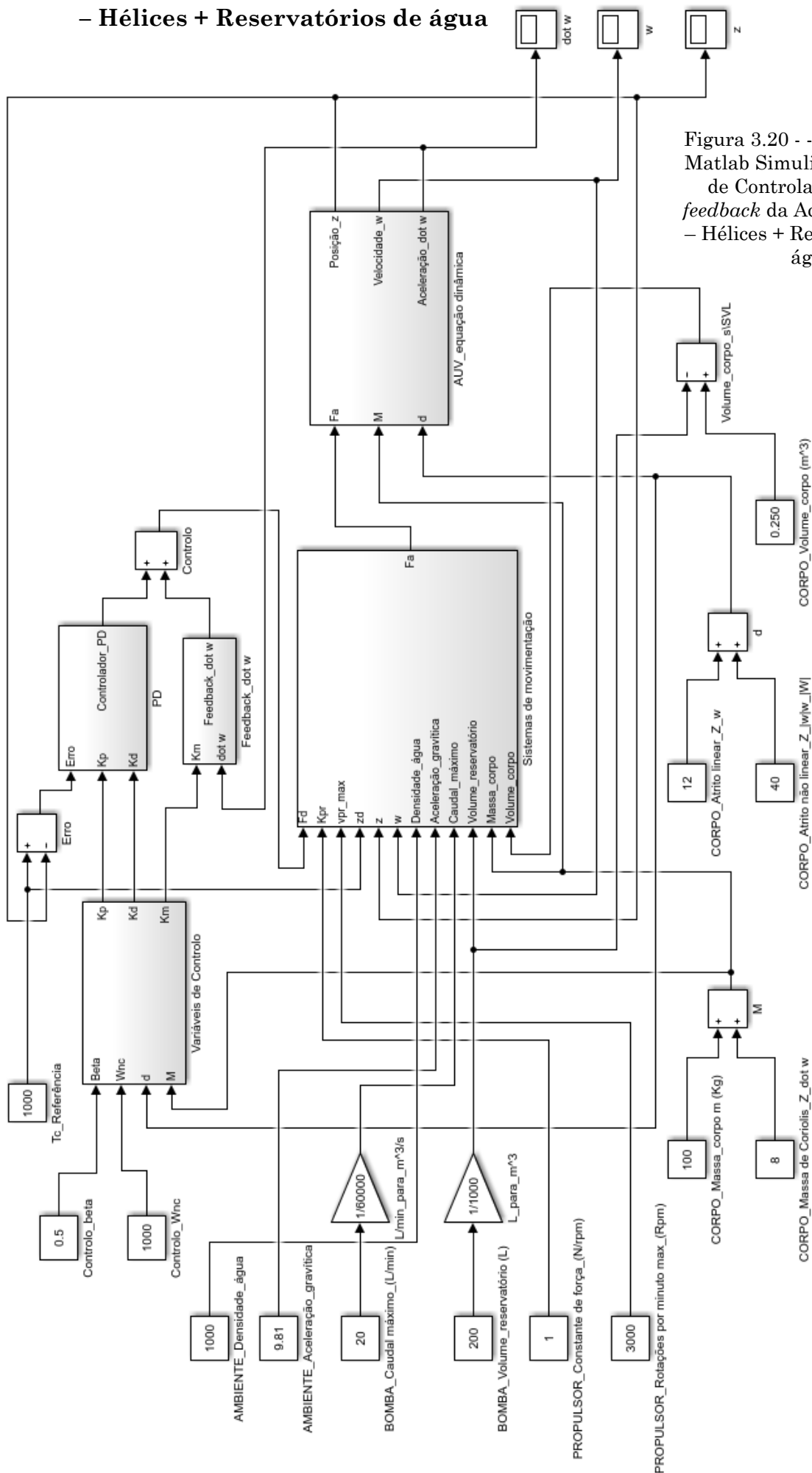


Figura 3.20 - - Diagrama em Matlab Simulink do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de entrada	1	2	3	4	
Volume do AUV ( $V$ )	<u>0,250</u>	<u>0,300</u>	<u>0,600</u>	<u>0,900</u>	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	<u>100</u>	<u>200</u>	<u>450</u>	<u>700</u>	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	<u>8</u>	<u>16</u>	<u>32</u>	<u>64</u>	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	<u>12</u>	<u>24</u>	<u>48</u>	<u>96</u>	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	<u>40</u>	<u>80</u>	<u>160</u>	<u>320</u>	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	1	1	1	1	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	3000	3000	(Rpm)
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{max}$ )	200	200	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	20	20	20	20	(l/min)

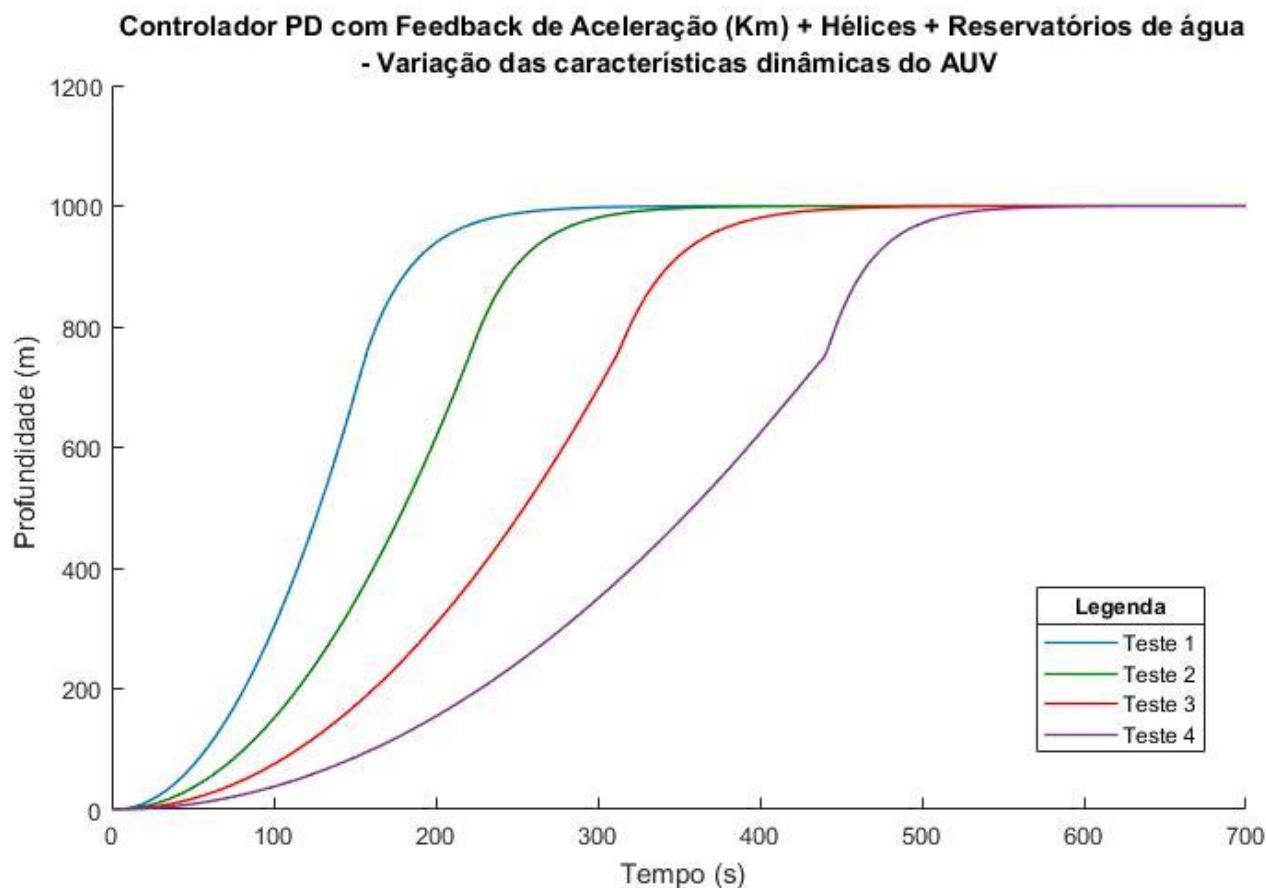


Figura 3.21 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes características dinâmicas.

Teste: Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de entrada	5	6	7	8	
Volume do AUV ( $V$ )	0,300	0,300	0,300	0,300	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	200	200	200	200	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	16	16	16	16	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	24	24	24	24	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	80	80	80	80	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	<u>0,1</u>	<u>0,25</u>	<u>0,5</u>	<u>1,5</u>	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	1	1	1	1	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	3000	3000	(Rpm)
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{rmax}$ )	200	200	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	20	20	20	20	(l/min)

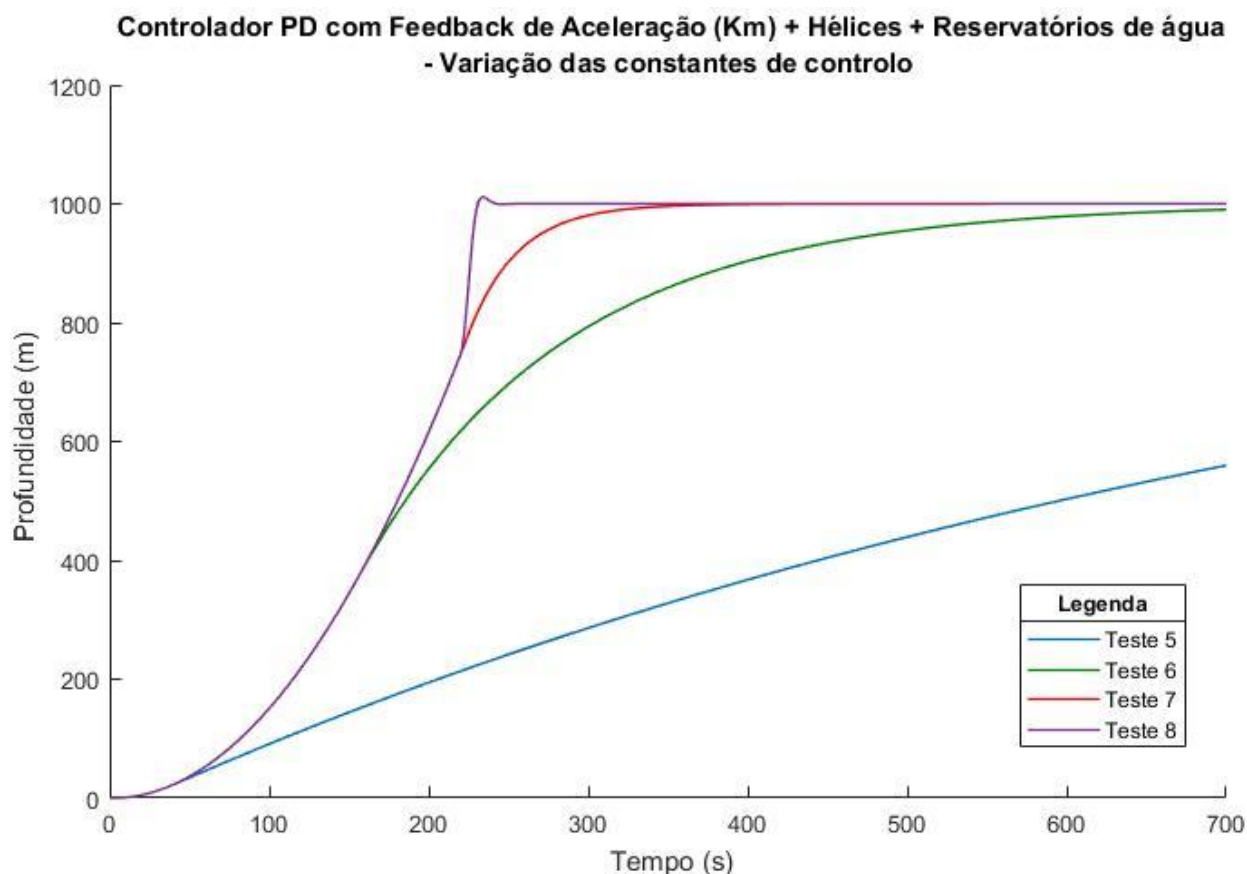


Figura 3.22 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes sistemas de atuação.

Teste: Diferentes sistemas de atuação para os mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de entrada	9	10	11	12	
Volume do AUV ( $V$ )	0,300	0,300	0,300	0,300	( $m^3$ )
Massa do AUV ( $m$ )	200	200	200	200	(Kg)
Massa adicionada ( $Z_w$ )	16	16	16	16	(Kg)
Atrito linear ( $Z_w$ )	24	24	24	24	(N/(m/s))
Atrito não linear ( $Z_{ w w}$ )	80	80	80	80	(N/(m/s) <sup>2</sup> )
Profundidade de docagem ( $T_c$ )	1000	1000	1000	1000	(m)
Frequência natural do controlo ( $\omega_{nc}$ )	1000	1000	1000	1000	
Parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ )	0,5	0,5	0,5	0,5	
Hélices: Constante Força/velocidade ( $K_h$ )	<u>10</u>	<u>1</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	(N/Rpm)
Hélices: Velocidade máxima do motor ( $K_h$ )	3000	3000	0	3000	(Rpm)
SVL: Volume máximo dos reservatórios ( $V_{max}$ )	200	0	200	200	(l)
SVL: Caudal máximo da bomba ( $Q$ )	<u>30</u>	<u>0</u>	<u>20</u>	<u>20</u>	(l/min)

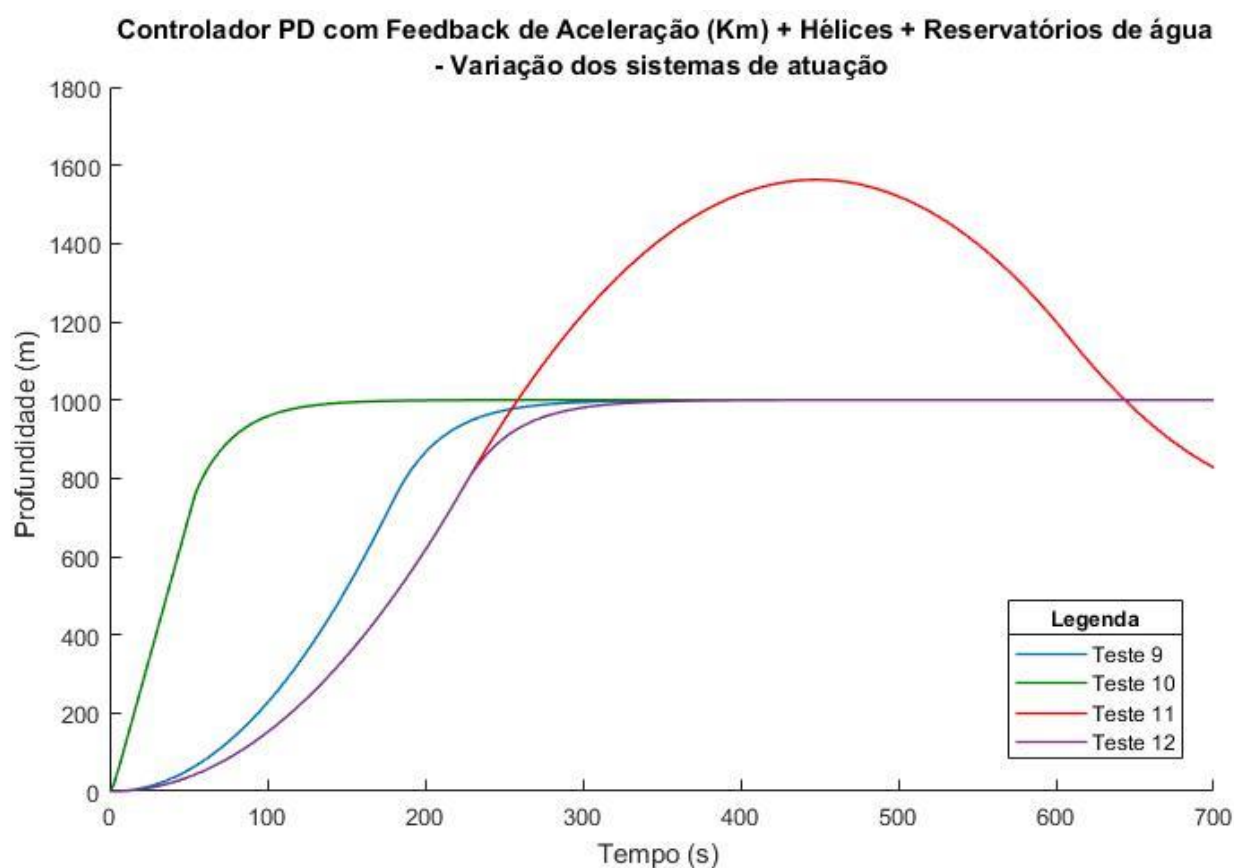


Figura 3.23 - Respostas do sistema de Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – Hélices + Reservatórios de água, para diferentes constantes de controlo.



## 4 Análise dos resultados

Nesta secção é realizada a análise dos resultados obtidos na secção anterior segundo os objetivos pretendidos:

- atingir a profundidade de docagem sem sobrelongação, e
- atender à eficiência do processo.

As respostas serão testadas segundo a sobrelongação obtida, tempo de acomodação e aproximação realizada.

### • Modelo: Malha fechada simples – atuação ideal

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação.

Variáveis de estudo	1	2	3	4	
Sobrelongação (h)	0	0	0	0	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	43	272	1517	2950	(s)

Estes resultados apresentam o ponto de partida do modelo criado, sendo utilizados como referência para os restantes resultados. Como podemos observar, e como era esperado, o aumento da massa e volume do AUV leva ao aumento dos tempos de acomodação.

### • Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km) – atuação ideal

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para as mesmas constantes de controlo.

Variáveis de estudo	1	2	3	4	
Sobrelongação (h)	0	0	0	0	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	172	172	172	172	(s)

Segundo os resultados obtidos podemos concluir que o sistema de controlo (Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)) adapta-se a diferentes conjuntos de parâmetros dinâmicos do modelo obtendo sempre a mesma resposta (devido aos parâmetros serem proporcionais entre os modelos).

Teste: Diferentes constantes de controlo para as mesmas características dinâmicas.

Variáveis de estudo	5	6	7	8	
Sobrelongação (h)	0	0	0	289	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	3860	172	34	18	(s)

Como era de esperar, ao aumentar o parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ ) o modelo diminui de amortecimento obtendo melhores tempos de acomodação, mas arriscando a sobrelongação. A definição individual deste parâmetro para cada modelo é interessante já que o seu ajuste permite a modificação drástica da resposta.

- **Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)**  
– Hélices

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de estudo	1	2	3	4	
Sobrelongação (h)	0	0	n/a	n/a	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	158	158	n/a	n/a	(s)

Teste Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de estudo	5	6	7	8	
Sobrelongação (h)	0	0	0	27	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	1852	158	71	69	(s)

Teste: Diferentes sistemas de atuação para os mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de estudo	9	10	11	12	
Sobrelongação (h)	0	0	0	0	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	158	158	158	158	(s)

Segundo os resultados obtidos nestes 3 testes podemos observar que o sistema dinâmico de Hélices definido é insensível a mudanças dos parâmetros dinâmicos do modelo e parâmetros de controlo, mas podendo ser ajustado segundo o parâmetro de controlo ( $\beta$ ). Isto deve-se ao sistema de SWITCH definido, que atua em diferentes alturas segundo os parâmetros do sistema, de forma a minimizar o tempo de acomodação. No entanto a minimização realizada é definida segundo as variáveis de controlo, podendo haver sobrelongação se estas forem incorretamente definidas.

- **Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)**  
– **Reservatórios de água**

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de estudo	1	2	3	4	
Sobrelongação (h)	407	593	632	608	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	599	1161	1481	1702	(s)

Teste Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de estudo	5	6	7	8	
Sobrelongação (h)	0	0	593	937	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	1621	844	1161	1971	(s)

Segundo os resultados obtidos dos 2 testes acima podemos observar que o sistema de reservatório de água não é totalmente fiável devido a demonstrar severas sobrelongações. Este problema deve-se à alta inércia deste tipo de sistema de movimentação que, ao responder às correções exigidas pelo controlador, não as consegue cumprir atempadamente.

Com o aumento da massa e volume do AUV esta inércia torna-se um fator crítico na resposta, tendo que ser estudada para o tipo de missões que o AUV terá de cumprir.

É possível corrigir até um certo nível as sobrelongações sentidos através do ajuste da parâmetro de controlo ( $\beta$ ), em troca da diminuição da velocidade de aproximação.

Teste: Diferentes sistemas de atuação para os mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de estudo	9	10	11	12	
Sobrelongação (h)	786	639	593	228	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	1711	1579	1161	452	(s)

Através dos testes acima indicados é possível apontar que a capacidade de caudal da bomba associada aos reservatórios é o principal fator que controla a inércia do sistema de movimentação.

- **Modelo: Controlador PD com *feedback* da Aceleração (Km)  
– Hélices + Reservatórios de água**

Teste: Diferentes características dinâmicas do AUV para os mesmos sistemas de atuação e constantes de controlo.

Variáveis de estudo	1	2	3	4	
Sobrelongação (h)	0	0	0	0	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	372	407	529	612	(s)

Teste: Diferentes constantes de controlo para os mesmos sistemas de atuação e características dinâmicas.

Variáveis de estudo	5	6	7	8	
Sobrelongação (h)	0	0	0	31	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	1571	984	411	254	(s)

Através dos resultados obtidos podemos observar que a resposta do sistema apresenta a junção das características dos dois sistemas anteriores:

- a componente dos Reservatórios de água realiza o início do movimento de aproximação à posição desejada a um rendimento elevado, mas a uma velocidade reduzida devida à inercia do próprio sistema;
- a componente das Hélices realiza a aproximação final atuando no momento necessário, permitindo eliminar a sobrelongação presente nas soluções dos Reservatórios de água. Também é de notar que, devido à aproximação suave, permitida pelos reservatórios, as hélices são atuadas a uma distância mais próxima da profundidade a atingir, relativamente à solução anterior que só possuiu hélices. Este fator permite uma maior conservação de energia devido ao menor tempo de acionamento das Hélices.

Teste: Diferentes sistemas de atuação para os mesmas características dinâmicas e variáveis de controlo.

Variáveis de estudo	9	10	11	12	
Sobrelongação (h)	0	0	593	0	(m)
Tempo de acomodação (Tac)	197	383	1161	411	(s)

Nesta última série de testes (testes 9,10,11 e 12) são apresentadas, em simultâneo, as respostas dos diferentes modelos estudados, de forma a verificar as conclusões tiradas.

Os testes 10 e 11 apresentam as respostas de modelos, que possuem só um dos tipos de sistemas de movimentação escolhidos: hélices e reservatórios, respectivamente. O teste 12 apresenta a resposta de um modelo que combina esses dois sistemas de movimentação. Como se pode observar, o testes 12 realiza uma aproximação inicial semelhante ao teste 11, utilizando os reservatórios de água, e uma aproximação final semelhante ao teste 10, utilizando as hélices.

Para verificar a alteração da resposta, devido a variações simultâneas das características dos sistemas de movimentação, é apresentado o teste 9. Servindo de ponto de comparação para o teste 12. O teste 9 possuindo sistemas com melhores características apresenta um resposta mais rápida que o teste 12, mas tendo uma forma de aproximação semelhante a este.

## 5 Conclusões

Do presente estudo foi possível concluir que a docagem amortecida é possível, tendo no entanto uma série de fatores que a condicionam e que devem ser levados em consideração.

Por um lado deverá existir um equilíbrio entre a força máxima dos atuadores e as características do AUV, tais como a sua massa e amortecimento, de forma a garantir uma aproximação suave. De facto, é necessário garantir que os sistemas de posicionamento dispõem de tempo suficiente para contrariar a inércia inerente ao veículo, efetuando assim uma aproximação suave.

No que toca aos sistemas de controlo, estes sistemas condicionam duplamente os objetivos propostos: segundo a alimentação que eles fazem dos sistemas de movimentação, (que no nosso caso é realizado segundo  $\alpha$  e  $\beta$  no sistema de controlador PD com *feedback* de aceleração (Km), e segundo os sistemas de Switch e o seu tempo de atuação (que dependendo do sistema de movimentação do veículo podem atuar mais cedo ou mais tarde alterando a forma da trajetória de aproximação).

Destas observações podemos inferir que o modelo de simulação numérico desenvolvido em *Matlab Simulink* permite realizar trajetórias de docagens amortecidas (sem sobrelongação) a tempos de acomodação reduzidos, sendo isto possível controlando os seguintes fatores do modelo:

- as capacidades e limitações dos componentes dos sistemas de movimentação que controlam a velocidade de aproximação, permitindo reduzir os tempos de acomodação com o risco do aumento da sobrelongação e instabilidade do sistema;
- o parâmetro de ajuste do controlador PD ( $\beta$ ) permite o controlo da alimentação dos sistemas de movimentação, permitindo a diminuição da sobrelongação e instabilidade do sistema em troca do aumento do tempo de acomodação;
- A variável temporal (X) do SWITCH, no caso do modelo com os dois sistemas de movimentação, permite o controlo do momento onde há a troca de atuação do sistema de variação de lastro (reservatórios de água) para as Hélices. O ajuste desta variável permite conservar energia de forma a atrasar a atuação das Hélices a custo de possíveis problemas em termos de sobrelongação e tempos de acomodação;

O modelo numérico desenvolvido no âmbito desta dissertação poderá revelar-se uma ferramenta com dupla função. Se por um lado permite aferir o desempenho de um AUV em estudo, utilizado de forma inversa permitirá o dimensionamento de equipamentos garantindo os comportamentos e respostas pretendidos.

Futuramente este projeto poderá ser continuado com a introdução de um sistema de controlo do tipo LQR (Linear Quadratic Regulator) e um sistema de definição de trajetória. Estes sistemas permitiram o estudo de trajetórias tridimensionais de aproximação às plataformas de docagem.

## Referências

- [1] Fossen T I 2011 *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*
- [2] Abbot H L 1881 Engraving - Bushnell's American Turtle *Libr. Congr. Prints Photogr. Div.*
- [3] Perry M J and Rudnick D 2003 Observing the Ocean with Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors: The Role of ALPS in Sustained Ocean Observing Systems *Oceanography* **16** 31–6
- [4] Woods S a, Bauer R J, Seto M L and Member S 2012 Autonomous Underwater Vehicles *IEEE J. Ocean. Eng.* **37** 727–39
- [5] Widditsch H R 1973 SPURV-The First Decade *APL-UW 7215, Appl. Phys. Lab. Univ. Washingt.* 32
- [6] Held J L and Bryant S B 1979 *Advanced Unmanned Search System (AUSS) Performance Analysis*
- [7] Bellingham J ., Leonard J J, Vaganay J, Goudey C A, Atwood D K, Consi T R, Bales J W, Schmidt H and Chrysostomidis C 1995 AUV Operations in the Arctic Sea *Ice Mech. Arct. Model. Work.* 1–9
- [8] Yoerger D R, Bradley A M and Walden B B 1991 The autonomous benthic explorer (ABE): An AUV optimized for deep seafloor studies *Proc. 7th Int. Symp. Unmanned Untethered Submers. Technol.* 75–85
- [9] Curtin T, Bellingham J, Catipovic J and Webb D 1993 Autonomous Oceanographic Sampling Networks *Oceanography* **6** 86–94
- [10] Xin B, Xiaohui L, Zhaocun S and Yuquan Z 2013 A vectored water jet propulsion method for autonomous underwater vehicles *Ocean Eng.* **74** 133–40
- [11] Medvedev A V., Kostenko V V. and Tolstonogov A Y 2017 Depth control methods of variable buoyancy AUV *2017 IEEE OES Int. Symp. Underw. Technol. UT 2017*
- [12] Ogata K Modern Control Engineering - Fifth Edition
- [13] Liu Y, Zhao X, Wu D, Li D and Li X 2015 Study on the control methods of a water hydraulic variable ballast system for submersible vehicles *Ocean Eng.* **108** 648–61
- [14] Wang W H, Engelaar R C, Chen X Q and Chase J G 2009 The State-of-Art of Underwater Vehicles – Theories and Applications *Mob. Robot. - State Art Land, Sea, Air, Collab. Mission.* **2000**
- [15] Jenkins S A and D'Spain G 2016 Autonomous underwater gliders *Springer Handb. Ocean Eng.* 301–21
- [16] Zakeri E, Farahat S, Moezi S A and Zare A 2016 Robust sliding mode control of a mini unmanned underwater vehicle equipped with a new arrangement of water jet propulsions: Simulation and experimental study *Appl. Ocean Res.* **59** 521–42
- [17] Sumantr B, Karsiti M N and Agustian H 2008 Development of variable ballast mechanism for depth positioning of spherical URV *Proc. - Int. Symp. Inf. Technol. 2008, ITSIm* **3** 1–6
- [18] Font R and García-Peláez J 2013 On a submarine hovering system based on blowing and venting of ballast tanks *Ocean Eng.* **72** 441–7
- [19] Zhao X, Liu Y, Han M, Wu D and Li D 2016 Improving the performance of an AUV hovering system by introducing low-cost flow rate control into water hydraulic variable ballast system *Ocean Eng.* **125** 155–69

- [20] Webb D C, Simonetti P J and Jones C P 2001 SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy *IEEE J. Ocean. Eng.* **26** 447 – 452
- [21] Manuel P and Nascimento H 2014 Otimização do ciclo termodinâmico e modelação dinâmica de um gerador hidráulico acionado termicamente
- [22] Effects P 2003 Seebeck and Peltier Effects Introduction *Seebeck Peltier Eff. Introd.* 1–8
- [23] Rossen S G 2008 Design Considerations for Engineering Autonomous Underwater Vehicles *Mech. Eng.*